AUGUST 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Störungen im Schlaf-Wach-Rhythmus — nature REVIEWS NEUROSCIENCE

> Astropionier Félix Tisserand

> Atom-Chips für Quantencomputer

> ESSAY: Kinder als Ingenieure

www.spektrum.de

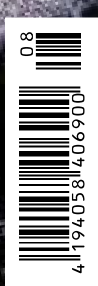
Die Zukunft des Wetters

HURRIKANE
Wie man sie steuern kann

PROGNOSEN
Wie der nächste Sommer wird

TORNADOS
Häufiger auch in Deutschland?

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €



ASTROPHYSIK
Kollidierende Asteroiden

IMMUNSYSTEM
Angeborene Frühwarnung

PSYCHOLOGIE
Was bewirkt unser Selbstwertgefühl?



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Die Kunst, sich selbstsicher zu fühlen

Haben Sie heute schon mal an sich gedacht? Wahrscheinlich ja, und vielleicht nicht nur einmal. Aber wichtiger: *Was* haben Sie dabei über sich gedacht? War es eher positiv oder negativ? Waren Sie von sich angetan oder enttäuscht? Entsprechend haben Sie vermutlich ein hohes oder geringes Selbstwertgefühl. Üblicherweise weicht das, was man von sich selbst hält, von dem ab, wie einen Mitmenschen einschätzen. Entsprechend erleben sich viele Menschen als zu minderwertig oder leiden an Selbstüberschätzung. Beides ist selten zuträglich, aber sich als minderwertig zu fühlen ist wohl das größere Problem.

Selbstbewusster und sozial kompetenter aufzutreten gilt vielen daher als Ziel ihres Verhaltens. Es soll wichtige Bezugspersonen und das soziale Umfeld zu einer positiveren Schätzung der eigenen Person bringen. Welche Faktoren ein positives Selbstwertgefühl versprechen, dazu existiert in jeder Gesellschaft weit gehend Konsens. In unseren kulturellen Breiten zählen dazu Attraktivität, Bildung, beruflicher Erfolg, Kontakt- und Konfliktfähigkeit.

Gewaltverbrecher haben im Allgemeinen durchaus eine hohe Meinung von sich

Wie drei amerikanische Psychologen jetzt in einer aufwändigen Metastudie feststellten, ist die Vorstellung, dass diese Faktoren ein besonders positives Selbstwertgefühl vermitteln, offenbar zumeist falsch. Die Forscher geben zwei Beispiele: Gewaltverbrecher haben im Allgemeinen durchaus eine hohe Meinung von sich; das widerspricht dem Bild, dass Aggressivität einem Minderwertigkeitsgefühl entspringe. Umgekehrt können für den beruflichen Erfolg ein ausgeprägt positives Selbstbild oder Selbstüberschätzung sogar negative Folgen haben. Eines haben die Psychologen immerhin festgestellt: Menschen mit hohem Selbstbewusstsein sind offenbar »wesentlich glücklicher« und verfallen seltener in »deprimierte Stimmungen«, egal welche Erfolgsfaktoren sie sonst vorzuweisen haben (S. 24).

Zwei Neuerungen finden Sie ab dieser Ausgabe in Ihrem »Spektrum«. Auf S. 92 präsentieren wir einen Artikel zum Thema Schlafstörungen. Er stammt aus der britischen Zeitschrift »Nature Perspective«. Wir bieten Ihnen damit die Möglichkeit, solche anspruchsvollen Übersichtsartikel mitzuverfolgen. Sagen Sie uns bitte (an www.spektrum.de/schlaf), ob Sie künftig solche Beiträge öfter lesen wollen!

Ebenfalls ab jetzt können Sie sich Artikel aus »Spektrum der Wissenschaft« auch anhören. Solche Beiträge kennzeichnen wir im Inhaltsverzeichnis sowie am Textende mit einem Lautsprechersymbol. Mehr Informationen dazu finden Sie auf der Internetseite www.spektrum.de/audio.

AUGUST 2005

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Von der Raumfähre Atlantis aus fotografiert, zeigt der Hurrikan Gordon vom November 1994 die ausladende Wirbelstruktur mit dem Auge im Zentrum

Bild: Corbis / Nasa
Titelgestaltung: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet
🔊 Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio



SEITE 24

PSYCHOLOGIE

Mythos Sebstbewusstsein

Verhilft die Stärkung des Selbstwertgefühls zu größerem Lebenserfolg? Bei kritischer Sichtung der Untersuchungen zum Thema lautet die Antwort nein. Nur in einem Punkt sind Selbstbewusste anderen überlegen: Sie fühlen sich besser

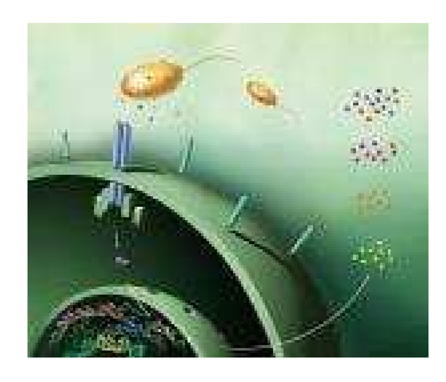


SEITE 60

PLANETENSYSTEM

Kollidierende Planetoiden

Offenbar sind in der Frühzeit des Sonnensystems zahlreiche Kleinplaneten zusammengestoßen. Der kosmische Crash ließ die felsigen Körper in ihrem Innern sogar schmelzen



SEITE 68

IMMUNOLOGIE

Frühwarnsystem gegen Erreger

Eine scheinbar primitive Form unserer körpereigenen Abwehr erweist sich als überraschend ausgeklügelt. Hier bieten sich mögliche neue Ansatzpunkte gegen die verschiedensten Krankheiten

SEITE 76

QUANTENTECHNIK

Atom-Chips – Fließbänder für Quantenwolken

Auf speziellen Mikrochips können ultrakalte Bose-Einstein-Gase per Magnetfeld geführt werden. Mit der neuen Technologie wollen Forscher besonders empfindliche Sensoren und Komponenten für Quantencomputer bauen





SEITE 86

ASTRONOMIEGESCHICHTE

Félix Tisserand, der vergessene Pionier

Stets stand er im Schatten seines Landmanns Pierre-Simon Laplace. Dabei zählt Félix Tisserand, der die klassische Himmelsmechanik zu neuen Höhen brachte, zu den hervorragendsten Astronomen des 19. Jahrhunderts

SEITE 92



PERSPEKTIVEN

Der malträtierte Schlaf-Wach-Rhythmus

Unsere moderne Lebensweise läuft der inneren Uhr oft genug zuwider – mit unerwartet gravierenden Folgen wie Depression oder Krebs. Was, wenn wir in Zukunft noch mehr die Nacht zum Tag machen?

AUGUST 2005

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Hotel Hilbert

Auf dem Weg ins Unendliche sollte man zumindest eine Nacht in diesem berühmten Etablissement verbringen – auch wenn es eine ziemlich unruhige Nacht wird

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Springers Einwürfe

Februar 2005 und Leserbrief Juni 2005

Wenn man diesen Beitrag und den Leserbrief von Herrn Dr. Löhr dazu liest, muss man die Intuition von Friedrich Nietzsche bewundern. In »Ecce Homo« schreibt er:

»So wenig als möglich sitzen; keinem Gedanken Glauben schenken, der nicht im Freien geboren ist und bei freier Bewegung – in dem nicht auch die Muskeln ein Fest feiern.« Friedrich Nietzsche: Ecce Homo. Warum ich so klug bin. Nr. 1. Kröner 1990, Bd. 77, S. 318.

Siegfried Schwehr, Umkirch

Ertrunken in der Zahlenflut

Nachgehakt, Mai 2005

Retten wir wirklich unsere Jugend vor dem Ertrinken in der Zahlenflut, indem wir ihr das mühsame Erlernen des Einmaleins ersparen? Es gibt natürlich lustvollere Themen und kurzweiligere Aufgaben als das Auswendiglernen einer Zahlentabelle. Aber wie groß ist die Gedächtnisleistung, die da allenfalls eingespart werden könnte?

Es geht beim kleinen Einmaleins um 81 Produkte, die auswendig zu lernen sind. Lässt man die trivialen Fälle mit dem Faktor 1 weg und nimmt außerdem an, ein normal begabtes Kind entdeckt früher oder später das Kommutativgesetz und nutzt es, bleiben noch 36 Produkte übrig. Wer diese kennt und daneben addieren kann, hat die Grundlage, um ohne jedes Hilfsmittel außer Papier und Stift schriftlich multiplizieren, dividieren, quadrieren oder mit Brüchen rechnen zu können.

Ein Mathematikunterricht ohne Einmaleins ist so sinnvoll wie ein Französischunterricht, bei dem man darauf verzichtet, die Hilfsverben *être* und *avoir* in Gegenwart, Vergangenheit und Zukunft zu konjugieren, weil die geplagten Schülerinnen andernfalls 36 Verbformen von *je suis* bis *elles auront* auswendig lernen müssten!

In keinem anderen Fach kann man mit so wenig Wissensstoff so viele Probleme anpacken und lösen wie in Mathematik. Ein guter Mathematiklehrer versteht es, den scheinbar so trockenen Zahlen auch Leben einzuhauchen.

Willi Botta, Rüttenen, Schweiz

Kelten im Doppelgrab

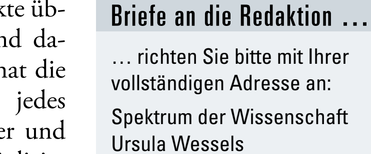
Forschung aktuell, Juni 2005

Die in dem Bericht über ein keltisches Doppelgrab gezeigte kunstvolle Fibel, deren Kopf dem eines Pferdes gleicht, dürfte doch nicht so einzigartig sein, da – wie aus beiliegendem Foto zu ersehen ist – eine ganz ähnliche Fibel auf dem Oberleiserberg bei Ernstbrunn in Niederösterreich gefunden wurde.

Dr. Walter Griebel, Ernstbrunn, Österreich



Doch nicht so einzigartig sind Fibeln in Pferdeform: Vor allem die linke der drei aus Niederösterreich stammenden Grabbeigaben ähnelt jener aus Reinheim.



Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Lust und Liebe – alles nur Chemie?

Rezensionen, Mai 2005

Die Rezensentin Dagny Lüdemann hebt mehrfach hervor, dass unser Buch »Lust und Liebe – alles nur Chemie?« keine Neuigkeiten vermittele und von uns der Vollständigkeit halber erwähnte Zusammenhänge so darstelle, als hätten wir zu dem Thema nicht mehr zu sagen. Die zahlreichen wissenschaftlichen Ergebnisse aus der modernen Hormonforschung, die in unserem Buch vorgestellt sind, werden dabei schlicht übergangen. So bleiben die Untersuchungen des Gehirns von Verliebten mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanz-Tomografie ebenso unerwähnt wie die aktuellen Forschungsergebnisse zu den »Treuehormonen« Oxytocin und Vasopressin.

Die angeblich nicht vorhandene chemische Erklärung zum viel beschriebenen Erscheinen eines hellen Lichts am Ende eines Tunnels bei Nahtoderscheinungen bieten wir sehr wohl an: Auf S. 147 und 148 beschreiben wir die Wirkung von Endorphinen und Encephalinen. Entgegen den Behauptungen der Rezensentin haben wir zum Thema Aphrodisiaka außer Austern und Kaviar etliches beizutragen. Die Seiten 193 bis 214 unseres Buchs mit aktuellen Bewertungen bekannter und weniger bekannter Potenzmittel und Aphrodisiaka beweisen genau das Gegenteil.

Gabriele und Dr. Rolf Froböse, Wasserburg

Immer wieder sonntags …

Forschung aktuell, April 2005

Vor 2000 Jahren in Israel

Der hier vorgestellte Kalender wurde bereits vor mehr als 2000 Jahren in Israel praktiziert. Grundlegende Angaben dazu findet man im jüdischen Schrifttum aus hellenistischer Zeit, das im 2. vorchristlichen Jahrhundert entstanden und im äthiopischen Henochbuch erhalten geblieben ist.

Darin sind Fragmente einer ursprünglich selbstständigen Schrift mit dem Titel »Das Buch von den Bewegungen der Himmelslichter« verarbeitet. Kapitel 74 behandelt das Solarjahr. Dort wird von einem Kalenderjahr von 364 Tagen ausgegangen, zu dem noch Tage hinzugezählt werden müssen, um auf ein volles Sonnenjahr zu kommen.

Ausgehend von einem Lunarjahr von 354 beziehungsweise 355 Tagen sollten innerhalb von 5 sowie weiteren 3 Jahren jeweils 10 Tage hinzugezählt werden. Doch ergibt dies keine praktische Angleichung des Mondjahres an das reale Sonnenjahr. Nimmt man jedoch die drei Jahre doppelt, dann ergeben sie zusammen 6 Jahre, und wir erhalten einen Wechsel von je 5 und 6 Jahren, auf die auch Gerhard Samulat hinweist.

Dass diese Art Angleichung praktiziert wurde, geht daraus hervor, dass die Gemeinde von Qumran offenbar nach diesem Kalender die Jahre berechnete. Auch sie arbeitete mit Schaltwochen von je 7 Tagen und erreichte so, dass kein jüdischer Feiertag jemals auf einen Sabbat fiel.

Hartmut Közle, Rietheim-Weilheim

Das Rad mehrmals neu erfunden

Marco Mastrofini schlug 1834 einen 364-Tage-Kalender vor, der 52 Siebentage-

wochen hatte und im Gemeinjahr einen, im herkömmlichen gregorianischen Schaltjahr zwei namenlose Schalttage brauchte.

1888 stellte Gustav Armelin einen Kalender mit 12 Monaten vor, die auf 4 Quartale zu je 91 Tagen aufgeteilt wurden. So begann jedes Quartal mit dem gleichen Wochentag, wenn die notwendigen Schalttage namentlich nicht integriert wurden.

Ein gleiches Projekt diskutierte der Völkerbund 1937, zusammengetragen von S. I. Seleschnikow in seinem Buch »Wieviel Monde hat das Jahr«, 1977.

Was treibt Herrn Henry an? Die Lust an einer zusätzlichen Ferienwoche, der Ehrgeiz unsterblich zu werden oder amerikanischer Hochmut, der sich nicht schert um Denker, die nicht in Englisch publizieren?

Wilfried Paszkowski, Meine

Freier Wille

April 2005

Vergleich mit Bremsassistent

Die Beobachtung, dass neuronale Aktivität in den Planungszentren für motorische Aktionen messbar wird, noch bevor wir uns einer Intention, solch eine Bewegung auszuführen, bewusst werden, erinnert mich an das technische Analogon des Bremsassistenten bei Autos beziehungsweise der elektronisch gesteuerten Bremse SBC.

Wenn sie richtig funktioniert, so zeichnet sie sich dadurch aus, dass eine elektrische Aktivität in den Steuerzentren für die elektronische Bremse messbar ist, noch bevor der Fahrer mit seinem Fuß das Bremspedal berührt, also sozusagen noch bevor dem Auto eigentlich die Intention zu bremsen bewusst werden könnte. Der Bremsassistent interpretiert hierbei ein eventuell schnelles Liften des Fußes vom Gaspedal als wahrscheinlich folgenden Bremswunsch und konfiguriert die Bremse schon mal vorsorglich hinsichtlich optimaler Bremskraft, das heißt, er verändert das Ansprechverhalten und die Kennlinie des Bremskraftverstärkers.

Aus dieser Sicht wäre das vorzeitige Auftreten einer neuronalen Aktivität in den motorischen Zentren nicht zwangsläufig ein Beweis für eine Ausschaltung des Willens beziehungsweise für eine automatische Handlung, dessen Willenshaftigkeit nur eine sekundäre Illusion wäre.


Selbst das Betätigen des Lichtschalters entpuppt sich als komplexe Abfolge von Zielen, Intentionen und Aktionen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Voraktivität der motorischen Planungszentren noch bevor eine Bewegungsintention bewusst wird, dürfte jedenfalls evolutive Vorteile hinsichtlich Optimierung der Reaktionsfähigkeit bringen, da die Zeit, in der die Bewegungsalternative sozusagen noch diskutiert wird, ohne dass eine endgültige Entscheidung gefällt wurde, bereits genutzt wird zur präventiven Planung der Durchführung der Bewegung. Dieser fertige Plan braucht dann nur noch vom Willen nach Beendigung des Entscheidungsfindungsprozesses abgerufen zu werden und es vergeht keine weitere Zeit zur Umsetzung.

Joachim Glaubitz, Göttingen

Ähnlich beim Trompetenspielen

Die Untersuchungen von Libet zeigten, dass das Bereitschaftspotenzial für die Armbewegung sich noch vor dem eigentlichen Willensurteil aufbaut. Eine interessante Erweiterung des Ansatzes wäre, den Probanden zwei Bewegungen zu erlauben (zum Beispiel den linken Fuß oder den rechten Arm). Baut sich nun in beiden Hirnhälften ein LBP respektive RBP auf oder nur in einer? Tritt es in beiden Hälften auf, könnte dies bedeuten, dass das Unterbewusstsein mögliche künftige Bewegungen vorbereitet, um so die Aktionszeit zu verkürzen. Dabei nimmt es natürlich in Kauf, dass solche Vorbereitungsarbeiten des Öfteren auch umsonst gemacht werden.

Meine Beobachtungen beim Trompetenspielen lassen auch auf eine Vorbereitungsarbeit schließen. Als Anfänger musste ich die Note bewusst auf der 3. Linie erkennen, sie als Ton h interpretieren, den Griff abrufen und den Ton anspielen. Als erfahrener Spieler kann ich unterdessen lose mit den Augen über die Linien gleiten, während alles andere eher unbewusst abläuft. Noch deutlicher wird dies bei ▷

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gabriele Engel, Dr. Markus Fischer, Dr. Eva Gottfried, Dr. Rainer Kayser, Dr. Bernard Oelkers, Dr. Jakob Reichel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

▷ sehr schnellen schwierigen Passagen (Lauf), die man als einheitliche Sequenz spielen muss. Das hier das Unterbewusstsein vorbereitend mitwirkt, wäre nachvollziehbar. Erst recht, wenn man die Schwierigkeiten bedenkt, eine falsch einstudierte Passage wieder zu korrigieren – ein extrem mühsames Unterfangen, welches massive Konzentration braucht.

Ganz interessant wäre auch zu wissen, was beim Improvisieren abläuft. In dem Moment spielt der Musiker »aus dem Herzen«, also ohne direkte bewusste Kontrolle.

Dr. Jörg Mäder, Opfikon, Schweiz

Experimente fehlinterpretiert

Was diese Experimente leisten, sind bestenfalls Messungen, wann und wo bestimmte Formen der Selbstwahrnehmung im Gehirn verarbeitet werden. Dummerweise ist jedoch nicht auszuschließen, dass die Messungen lediglich den Speichervorgang erfassen, um sich die Zeigerstellung zum Zeitpunkt des auslösenden internen Signals zu merken. Erst beim Erfragen nach der Messung, wo denn der Zeiger stand, ist es wirklich notwendig, dass der Proband sich den Zeitpunkt bewusst macht.

In jedem Fall sagen die Messungen jedoch absolut nichts darüber aus, zu welchem Zeitpunkt Willensentscheidungen getroffen werden, die Handlungen hervorrufen. Aus dem Experiment abzuleiten, dass es nur »freies Nichtwollen« geben würde, ist schlicht falsch. Dass solche eklatanten Fehlinterpretationen auch noch über Jahrzehnte hinweg Einfluss auf wissenschaftliche Arbeiten haben, ist erschreckend. Es sollte eigentlich beste wissenschaftliche Tradition sein zu hinterfragen, ob ein Experiment auch das messen kann, was der Experimentator glaubt zu messen.

Dieter Kohl, Ludwigsburg



STEFAN MAYR

Winterliche Schönwetterperioden bewirken zahlreiche Gefrier-Tau-Zyklen im Holz von Bäumen an der alpinen Waldgrenze.

Baumembolien

Mai 2005

Unterdruck und Außendruck

Die Autoren gehen nur kurz auf den ungestörten Transport ein und skizzieren ihn so, als würde jemand an den Blättern oder Nadeln saugen und damit Unterdruck erzeugen. Sie berichten weiter, sie hätten bei der untersuchten Baumart Unterdrücke bis zu minus 25 Bar gefunden. Das macht mich stutzig.

Wie kann man durch Saugen einen Unterdruck von mehr als dem Außendruck erzeugen? Saugt man nämlich an einem geschlossenen Gefäß, kann man darin bestenfalls nahezu Vakuum herstellen und damit den Druck bis fast auf null absenken. Der Unterdruck wäre, wenn dies in der Atmosphäre geschieht, etwa 1 Bar.

Dr. Günter Green, Strande

Antwort des Autors Stefan Mayr:

»Druck« beziehungsweise »Unterdruck« sind Begriffe für makroskopische physikalische Größen. Der Wassertransport in Pflanzen spielt sich jedoch in mikroskopisch kleinen Leitgefäßen ab, in denen auch Kräfte zwischen den beteiligten Molekülen vermehrt zum Tragen kommen. Wir befinden uns also irgendwo im Grenzbereich zwischen Physik und Chemie und untersuchen den Energiezustand der Wassersäulen. Dieser Energiezustand wird korrekt als »Wasserpotenzial« bezeichnet und kann in Druckgrößen angegeben werden.

Gefrier-Tau-Zyklen

Was wird passieren, wenn zur Schneeschmelze (bei Flachwurzlern) reichlich Wasser im Wurzelbereich ist und oft große tägliche Temperaturschwankungen auftreten? Das Wasser in den Leitungsbahnen wird auskühlen, Gasblasen bilden und dadurch sein Volumen vergrößern. Oder es wird sogar frieren und nochmals größer werden.

Wo soll das zusätzliche Volumen Wasser nun hin? Nadeln verdampfen es nicht schnell genug oder (bei der Lärche) sind noch nicht da. Also wird es wohl einen Platz in leeren Bahnen suchen müssen. Wenn das Volumen bei steigender Temperatur wieder sinkt, wird aus dem Wurzelstock befüllt.

Möglicherweise ist das mit ein Vorteil des Ventilsystems: Wasser nahe dem Gefrierpunkt hätte bei Membranen eher Probleme als bei der Tüpfeltorus-Methode.

Die Flachwurzeln wären ebenfalls ein Vorteil – nur so ist eine gute Wasserversorgung im Frühjahr sicher; in tieferen Schichten taut der Boden viel später auf. Nicht zuletzt gibt der Querschnitt des Astes Hinweise – die stärkeren Temperaturschwankungen ausgesetzte Oberseite ist eher befüllt als der Rest.

Dipl.-Ing. Michael Schindler, Wien

Antwort des Autors Stefan Mayr:

Wir haben auch schon daran gedacht, dass die Gefrier-Tau-Zyklen und die damit verbundenen Wasserverschiebungen zwischen Holz und Rinde bei der Beseitigung von Embolien wichtig sein könnten (neue Gasblasen dürfen sich dabei jedoch nicht bilden). Allerdings konnten wir derartige Wiederbefüllungen beobachten, bevor das Wasser im Boden zugänglich war.

Wie jedoch Bäume Wasser von ihrer Oberfläche – vorbei an den unter Zugspannung stehenden, intakten Leitelementen – in die embolierten Leitgefäße bringen können, ist noch nicht geklärt. ◁

KLIMA

Eispanzer der Ostantarktis wächst

Während der westliche Teil der Antarktis immer mehr abtaut, wächst im Osten die Eisdecke. Dies ist das scheinbar paradoxe Ergebnis einer Analyse von Daten der Esa-Satelliten ERS-1 und ERS-2 aus der Zeit von Juni 1992 bis Mai 2003 durch ein Team um Curt H. Davis von der Universität von Missouri in Columbia. Demnach nahm die mittlere Eisdicke in der Westantarktis in diesen elf Jahren um 9,9 Zentimeter ab, während sie im Osten knapp zwanzig Zentimeter zulegte, was 45 Milliarden Tonnen entspricht. Insgesamt wurde am Südpol also mehr Wasser gebunden als freigesetzt. Der Anstieg des Meeresspiegels auf Grund der globalen Erwärmung fiel dadurch um etwa 0,12 Millimeter pro Jahr geringer aus.

Das Ergebnis entspricht dem, was die Fachwelt schon lange vermutet und auch Computersimulationen vorhergesagen: Aus den sich erwärmenden Ozeanen verdunstet zunehmend Meerwasser, wodurch in der noch immer sehr kalten Ostantarktis mehr Schnee fällt. Allerdings ist dieser Effekt vorübergehend. Wenn sich die Erde weiter aufheizt, wird auch am Südpol schließlich die Eisschmelze überwiegen – wie heute schon auf Grönland und fast überall im Hochgebirge. *Science, 24. 6. 2005, S. 308*



Die Ostantarktis ist der einzige Platz auf der Erde, an dem die Eisdecke großräumig zunimmt. Die Luftaufnahme zeigt den Hatherton-Gletscher.

ASTRONOMIE

Ferner, heißer Vetter der Erde

Gut 150 extrasolare Planeten haben die Astronomen bisher aufgespürt. Als kosmische Brüder der Erde kann man sie freilich kaum bezeichnen. Denn alle wiegen sie mindestens so viel wie Uranus und sind entweder Gasriesen oder umkreisen einen Pulsar statt einer Sonne. Doch nun ist ein US-Forscherteam mit dem Keck-Teleskop auf Hawaii auf ein Exemplar gestoßen, das nur etwa die 7,5fache Masse der Erde und den doppelten Radius hat. Da seine Schwerkraft nicht ausreichen dürfte, um eine dichte Gashülle festzuhalten, ist seine Oberfläche vermutlich steinig. Der kleine Geselle umkreist den etwa 15 Lichtjahre entfernten Stern Gliese 876.

Dieser so genannte M-Zwerg, der rund ein Drittel der Sonne wiegt, hat noch zwei weitere Trabanten: Gasplaneten, die schon früher entdeckt wurden, weil sie ihren Mutterstern periodisch wackeln lassen. Eine zusätzliche schwache Zitterbewegung verriet nun die Gegenwart des dritten Begleiters.

Ganz so weit ist es mit dessen Verwandtschaft zu unserem Heimatplaneten allerdings auch nicht her: Sein Bahnradius beträgt nur etwa drei Millionen Kilometer – gut ein Zwanzigstel des Abstands von Merkur zur Sonne. Deshalb ist es auf seiner Oberfläche brütend heiß, nach Schätzungen der Forscher 200 bis 400 Grad Celsius. Und ein Umlauf dauert nur knapp zwei Tage. *National Science Foundation, 15. 6. 2005*



TRENT SCHINDLER, NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

So könnte er aussehen: der neu entdeckte erdähnliche Planet um den Stern Gliese 876.



USGS

ARCHÄOLOGIE

Altägyptische Glaswerkstätte

Schon in der späten Bronzezeit waren Glasgefäße ein geschätztes Handelsgut. Das belegen Funde in Mesopotamien und Ägypten. Unklar blieb bisher allerdings, woher das Glas stammte. Anhand der chemischen Zusammensetzung alleine gelang es nicht, den Herkunftsort eindeutig zu bestimmen. Nun haben Edgar Pusch vom Pelizaeus-Museum in Hildesheim und Thilo Rehren vom University College London in Quantir im östlichen Nildelta eine Werkstatt entdeckt, in der zylindrische Glasrohlinge produziert wurden. Sie stammt aus der Zeit um 1250 v. Chr.

Anhand von Keramikscherben, an denen sich noch Glasreste befanden, gelang es den Wissenschaftlern außerdem, das Herstellungsverfahren nachzuvollziehen. Demnach verschmolzen die Altägypter im ersten Schritt Quarzsand und Pottasche bei etwa 900 Grad Celsius. Als Behälter dienten ausrangierte Keramikgefäße, beispielsweise Bierkrüge, die anschließend abgeschlagen wurden. Zum Auswaschen von Verunreinigungen zertrümmerten die Handwerker das halb fertige Glas, um die Splitter in einem zweiten Durchgang in zylindrischen Gefäßen bei rund 1000 Grad Celsius zu zehn Zentimeter dicken Rohlingen einzuschmelzen. Dabei fügten sie oft Metalloxide hinzu, um das Material zu färben und ihm so das Aussehen wertvoller Edelsteine zu verleihen.

Science, 17. 6. 2005, Bd. 308, S. 1756



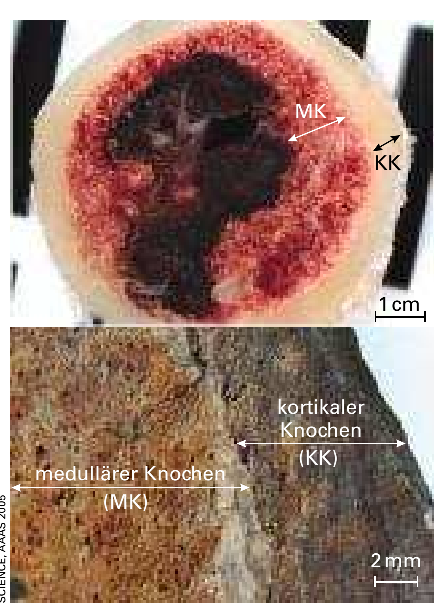
SCIENCE, AAAS 2005

Scherben beweisen: In zylindrischen Keramikgefäßen produzierten Ägypter schon vor mehr als 3200 Jahren Glasrohlinge.

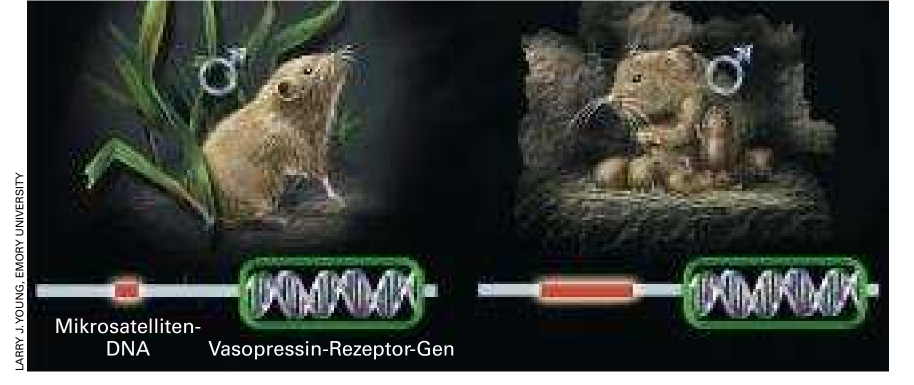
PALÄONTOLOGIE

Dinojunge oder Dinomädchen?

Bei Fossilien ist die Geschlechtsbestimmung nicht ganz einfach. Charakteristische Weichteile versteinern nicht, und nur in wenigen Skeletten weisen Reste von Eiern eindeutig auf ein weibliches Tier hin. Deshalb ist so mancher *Tyrannosaurus rex* in den Museen wohl in Wahrheit eine Regina. Doch dieser Irrtum sollte sich schon bald korrigieren lassen; denn ein amerikanisches Forscherteam um Mary Schweitzer von der North Carolina State University in Raleigh hat nun ein neues Unterscheidungsmerkmal entdeckt. Auf seine Spur kam es durch den Vergleich mit heutigen Laufvögeln. Hier deponieren die Weibchen vor der Eiablage Kalzium im Innern ihrer Röhrenknochen. Die dabei gebildete »Spongiosa« ist porös und mit vielen Blutgefäßen durchsetzt, die mithelfen, den Mineralstoff zum sich entwickelnden Ei zu transportieren. Schweitzer und ihre Mitarbeiter entdeckten nun genau das gleiche Knochengewebe in einem 70 Millionen Jahre alten *T.-rex*-Fossil. Demnach musste es sich um eine Dame handeln. Der Befund kann nicht nur allgemein bei Raubsauriern zur Unterscheidung von Männchen und Weibchen dienen, sondern belegt auch deren Verwandtschaft mit den Vögeln. *Science, 3. 6. 2005, S. 1456*



Der Röhrenknochen einer Henne (oben) und eines weiblichen *T. rex* enthält ein spezielles Gewebe (MK), das sich vor der Eiablage bildet.



LARRY J. YOUNG, EMORY UNIVERSITY

▲ Der Unterschied zwischen Casanova und treu sorgendem Familienvater liegt bei den Wühlmäusen in der Länge einer Mikrosatelliten-DNA vor dem Gen für den Vasopressin-Rezeptor.

VERHALTEN

Schrott-DNA macht treu

Die Männchen der Präriewühlmäuse sind monogam und häuslich. Dagegen lieben ihre Cousins in den Rocky Mountains die Abwechslung und ihre Freiheit. Die Aufzucht der Jungen überlassen sie den Weibchen. Den Grund für den Unterschied entdeckten Forscher schon vor über einem Jahr: Präriewühlmäuse haben deutlich mehr Rezeptoren für das Hormon Vasopressin im Hirn als ihr leichtlebigen Verwandten in den Bergen. Doch wie kommt es dazu?

Die Antwort haben nun Elizabeth Hammock und Larry Young von der Emory-Universität in Atlanta gefunden. Entscheidend ist demnach eine so genannte Mikrosatelliten-DNA: ein sich stupide wiederholendes kurzes Stück Erbsubstanz – quasi eine Stottersequenz – in der Nähe des Gens für den Vasopressin-Rezeptor. Rocky-Mountains-Wühlmäuse haben nur wenige solche Wiederholungen, die Prärienager dagegen viele.

Durch Genmanipulation verlängerten die Forscher also bei den Treulosen den Stotterbereich: Prompt verwandelten sich die Casanovas in brave Familienväter. Offenbar reguliert also ein kurzes, sinnlos scheinendes DNA-Stück die Aktivität des Gens für Vasopressin und entscheidet damit über ein wichtiges Verhaltensmerkmal. Dahinter steckt durchaus Methode: Die Länge von Satelliten-DNAs kann schnell mutieren – weshalb man sie auch für den genetischen Fingerabdruck verwendet. Das ermöglicht rasche Anpassungen bei ererbten Verhaltensmustern. *Science, 10.6. 2005, S. 1630*

PSYCHOLOGIE

Rechnende Rhesusaffen

In einem Experiment offenbarten Rhesusaffen jetzt ein unerwartetes Zahlenverständnis. Forscher um Elisabeth Brannon von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) und Nikos Logothetis vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen spielten den Tieren Stimmen von zwei oder drei Artgenossen vor. Zugleich erschienen auf zwei Monitoren zwei oder drei brüllende Affen. Die Tiere fixierten daraufhin immer den Bildschirm, der die richtige Anzahl rufender Artgenossen zeigte. Die Affen erwarteten demnach genauso viele Gesichter zu sehen, wie sie Stimmen gehört hatten. Sie können also die gesehene und gehörte Information miteinander kombinieren.

Nach Ansicht der Forscher müssen die Tiere deshalb über ein abstraktes Zahlenkonzept verfügen, das unabhängig vom angesprochenen Sinnesorgan ist. Diese Fähigkeit dürfte ihnen in freier Wildbahn helfen, die Größe eines nahenden Rudels am Gebrüll abzuschätzen. Bislang galt die Sprachfähigkeit als Voraussetzung für den abstrakten Umgang mit Zahlen. Weitere Studien sollen nun zeigen, ob Kleinkinder, die noch nicht sprechen können, die gleiche Leistung vollbringen. *Current Biology, 7.6. 2005, S. 1034*

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

MAURITIUS

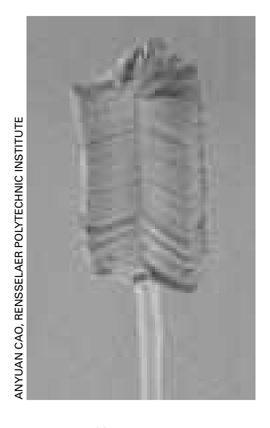
◄ Rhesusaffen verfügen über ein abstraktes Zahlenverständnis.

TECHNIK

Die kleinste Bürste der Welt

Nanogeräte sind höchst anfällig selbst für winzige Dreckpartikel und waren bislang kaum zu reinigen. Doch ein Team um Anyuan Cao vom Rensselaer Polytechnic Institute in Troy (New York) hat jetzt Minibürsten entwickelt, deren Borsten tausendmal dünner sind als ein menschliches Haar – ideale Voraussetzungen, um im Nanoreich für Sauberkeit zu sorgen.

Zur Fabrikation der winzigen Besen dient die so genannte chemische Gasphasenabscheidung. Eine Siliziumkarbid-Faser wird dazu am einen Ende – dem späteren Stiel – mit einer schützenden Goldschicht überzogen und in ein heißes Gas gebracht, das aus Kohlenstoffverbindungen besteht. Diese zersetzen sich am nicht vergoldeten Bereich zu so genannten Nanoröhren, die senkrecht von der Faser abstehen und zu langen Borsten heranwachsen. Die so erzeugten Minibürsten sind ausgesprochen robust und elastisch. In Tests schnitten sie sehr viel besser ab als alle zuvor verwendeten, brüchigeren Materialien wie Tierhaare, Polymerfasern oder Metalldrähtchen.



ANYUAN CAO, RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE

◄ Winziger Feger: Mit nur dreißig Nanometer dicken Borsten sorgt diese Minibürste für Sauberkeit im Nanoreich.

Vorerst sollen die kleinen Besen vor allem zum Bemalen von Mikrostrukturen und natürlich zum Fegen von Nanostaub eingesetzt werden. Wenn sich zeigt, dass sie nicht haaren, könnten sie aber auch für medizinische Zwecke dienen – beispielsweise um in verletzten Blutgefäßen Schutzfilme aufzutragen oder Plaques zu entfernen. *Nature Materials, Online-Vorabveröffentlichung, 12.6. 2005*

Mitarbeit: Eva Hörschgen und Stephanie Hügler

KAREN M. WARKENTIN, BOSTON UNIVERSITY

Frühgeburt bei Schlangenangriff

Der Laich von Baumfröschen im tropischen Regenwald ist für Schlangen wie die gebänderte Katzenaugennatter *(Leptodeira septentrionalis)* eine Delikatesse. Deshalb hat der Rotaugenlaubfrosch *(Agalychnis callidryas)* eine besondere Notfallrettungsmaßnahme bei drohender Gefahr entwickelt. Wie Karen M. Warkentin von der Universität Boston (Massachusetts) herausfand, können die Embryonen in den Eiern beim Nahen einer Schlange bis zu dreißig Prozent vor der Zeit schlüpfen *(Animal Behavior, 7/2005, S. 59)*. Die meisten entgehen so dem Gefressenwerden. Auf dem Foto aus Costa Rica sieht man, wie eine Kaulquappe im letzten Moment den Absprung schafft und von dem Gelege, das senkrecht an einem Bromelienblatt klebt, ins Wasser plumpst.

Als Warnsignal fungiert nach den Untersuchungen von Warkentin eine charakteristische niederfrequente Vibration, wie sie nur sich nähernde Schlangen erzeugen. Das Trommeln von Regentropfen auf das Blatt alarmiert die Tiere dagegen nicht. Chemische Signale spielen ebenfalls keine Rolle, denn die Kaulquappen schlüpfen auch dann vorzeitig, wenn Vibrationen der richtigen Frequenz künstlich erzeugt werden. Offensichtlich verfügen die Embryonen über einen Detektor, der verschiedene Arten von Schwingungen unterscheiden kann.

INFORMATIK

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Supercomputer – Aufbruch in neue Dimensionen

Auf der Liste der 500 schnellsten Rechner der Welt stehen 200 Neuzugänge aus dem letzten halben Jahr. Verschiedene Hersteller rüsten sich zum Sturm auf die nächste Zehnerpotenz an Rechenleistung: den Petaflops-Rechner.

Von Christoph Pöppe

Eine schlichte Aufzählung, die zweimal im Jahr auf den neuesten Stand gebracht wird, spiegelt das Geschehen auf einem sehr speziellen Markt: die Top500, die Liste der 500 schnellsten und rechenstärksten Computer der Welt. Anlass der Veröffentlichung ist jeweils eine internationale Tagung, eine große im November in den USA und eine kleine im Juni in Deutschland. Letztere feiert in diesem Jahr ihr zwanzigstes Jubiläum unter ihrem immer noch aktiven Initiator Hans Meuer, dem ehemaligen Chef des Mannheimer Universitätsrechenzentrums.

Anders als im letzten Jahr, in dem eine gewisse Konsolidierung zu verzeichnen war (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 85), gibt es diesmal heftige Bewegung zu vermelden. Gegenüber dem Stand vom vergangenen Herbst sind 200 Maschinen dazugekommen und folglich ebenso viele herausgefallen. Um überhaupt noch auf der Liste zu erscheinen, muss man eine Leistung aufbieten, die vor fünfzehn Jahren noch ein Traumziel und vor zwölf Jahren Weltspitze war: ein Teraflops, sprich eine Billion (10^{12}) Rechenoperationen pro Sekunde.

Unter den 200 Neuzugängen tragen die meisten ein und dasselbe Firmenschild: IBM. Der lange Jahre als schwerfällig und bürokratisch belächelte Konzern, der obendrein erst seit etwa einem Jahrzehnt wieder im obersten Leistungssegment mitspielt, hat mehr als die Hälfte aller 500 Listeneinträge sowie sechs der zehn vordersten Plätze erobert – darunter die ersten beiden – und damit einen beachtlichen Spurt an die Spitze hingelegt.

Der momentan schnellste Computer der Welt heißt Blue Gene/L und steht im Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium, das vom US-Energieministerium betrieben wird. Seine 65 536 Prozessoren bringen es auf reichlich 130 Teraflops – in der derzeitigen Ausbaustufe; in den nächsten Monaten soll sich diese Anzahl und damit die Leistung noch verdoppeln. Nummer 2 steht beim Hersteller im Thomas-J.-Watson-Forschungszentrum und kommt auf etwa 90 Teraflops. Der legendäre japanische Earth Simulator, der 2002 in einem Überraschungscoup Platz 1 eroberte und immerhin zweieinhalb Jahre halten konnte, ist auf Platz 4 abgerutscht.

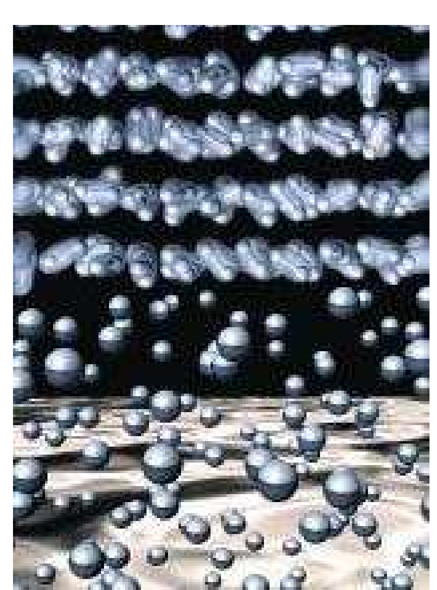
Auf der europäischen Ebene sind Deutschland mit 40 und Großbritannien mit 32 Systemen am stärksten vertreten, während das einst sehr aktive Frankreich sich am Rennen um die leistungsfähigsten Rechner kaum noch beteiligt. Der europäische Spitzenreiter steht überraschenderweise in Spanien. Die Zentralregierung in Madrid und die katalanische Regionalregierung haben zusammengelegt, um in Barcelona »Mare nostrum« zu installieren. Mit knapp 28 Teraflops belegt die IBM-Maschine, die nach der altrömischen Bezeichnung für das Mittelmeer benannt ist, Platz 5 auf der Liste. Der schnellste deutsche Rechner kommt erst an 27. Stelle, steht in Stuttgart und ist ausnahmsweise nicht von IBM, sondern von der japanischen Firma NEC, die auch den Earth Simulator hergestellt hat.

Armut, Keuschheit und Gehorsam

Das viel zitierte Moore'sche Gesetz, nach dem alle wesentlichen Parameter der Computerindustrie – Rechenleistung, Miniaturisierung, Preis – sich alle anderthalb Jahre um den Faktor 2 verbessern, hat sich abermals bestätigt, aber nicht mehr in jeder Hinsicht. Würde es seine absolute Geltung bewahren, müsste nach einer einfachen Extrapolation ungefähr im Jahr 2015 ein Transistor aus weniger als einem Atom bestehen.

Diese theoretische Grenze wirft heute schon ihre Schatten voraus. Noch ist die durch weitere Verkleinerung erhöhte Störanfälligkeit kompensierbar, aller-

Unter hohem Druck soll molekularer Wasserstoff aus dem festen Zustand (links oben) in eine so genannte Quantenflüssigkeit (links unten) übergehen. Dieser Übergang wurde mit dem weltschnellsten Computer Blue Gene/L simuliert, der im Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium steht (rechts).





LINKS: LIAM KRAUSS / VISUALIZATION GROUP LLNL; RECHTS: BOB HIRSCHFELD / LLNL



»Mare nostrum«, der momentan schnellste Superrechner Europas, ist in einer ehemaligen Kirche in Barcelona installiert und zur besseren Kühlung in einen Glaskasten verpackt.

dings nur um den Preis eines steigenden Stromverbrauchs. Der wiederum treibt die Wärmeabgabe pro Quadratzentimeter, die nach der alten, groben Theorie eigentlich nicht von der Bauteildichte abhängen sollte, in Höhen, die mit Luftkühlung nicht mehr zu bewältigen sind. Schon jetzt heizen die neuesten Chips pro Flächeneinheit zweieinhalbmal so stark wie ein Dampfbügeleisen.

Nachdem eine schlichte Verkleinerung aller Bauteile kaum noch etwas einbringt, beginnen die Hersteller andere Reserven auszuschöpfen. Multi-Core-Chips – mehrere Prozessoren auf ein und demselben Chip – sind eine Möglichkeit (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90). Das Erfolgsmodell von IBM, der eServer, macht davon mit zwei Stück pro Chip jedoch nur mäßigen Gebrauch. Entscheidend ist vielmehr sein geradezu mönchiches Arbeitsprinzip. Jeder Prozessor sitzt in seiner Zelle und arbeitet, unter intensivem Austausch mit den Klosterbrüdern. Der Kontakt nach außen ist dagegen sehr eingeschränkt und findet nur über einen speziellen Input-Output-Chip statt.

Von den drei klassischen Mönchstugenden ist der Gehorsam nicht weiter bemerkenswert – jeder Computer tut schließlich stets das, was sein Programm ihm sagt –, die Keuschheit dagegen schon eher: Gewisse Instruktionen, welche aus dem normalen Ablauf der Tätigkeiten herausfallen und schon deswegen viel Zeit in Anspruch nehmen, versteht der Prozessor zwar, führt sie aber nicht selbst aus, sondern reicht sie weiter. Dadurch braucht er mit den entsprechenden Fähigkeiten auch gar nicht mehr ausgestattet zu sein, was ihn einfacher, preiswerter und – Armut! – genügsamer macht: Der Stromverbrauch pro Rechenakt sinkt auf ein Zehntel des bisherigen Standardwerts.

Statt »Giga« und »Tera« bald »Peta« und »Exa«

Die Computer auf der Top500-Liste sind in ihrer Mehrheit Cluster, das heißt eher lose Zusammenschlüsse von massengefertigten, nicht eigens für diesen Zweck ausgelegten Rechnern. Ihre interne Verständigung folgt in den meisten Fällen einem etablierten Protokoll namens MPI *(message passing interface)*. Beides hat dem Hochleistungsrechnen im letzten Jahrzehnt einen enormen Auftrieb gegeben, erweist sich inzwischen aber als Hemmnis für die Entwicklung neuer Konzepte. Denn der schiere Erfolg der über MPI verkoppelten Cluster und die Tatsache, dass sie sich als Quasistandard etabliert haben, fordern von jedem, der es besser machen will, gewaltige Anstrengungen mit ungewissem Ausgang.

Dasselbe gilt für die Liste der Top500 selbst, die mit ihrer Fixierung auf die eine Zahl »Rechenleistung in Teraflops« und der Vorschrift zu deren Ermittlung den Fortschritt heute eher behindert. Gemessen wird die Leistung mit einem festgelegten Satz von Rechenaufgaben, der so genannten Linpack Benchmark, die schon lange nicht mehr repräsentativ für das moderne Hochleistungsrechnen ist. Aber für einen guten Platz unter den Top500 sind die – in der Regel staatlichen oder staatsnahen – Geldgeber eher bereit, die Millionen springen zu lassen, als dafür, den prestigeträchtigen Geräten die geeignete Software auf den Leib zu schreiben, obgleich dieses Geld weitaus besser investiert wäre.

In den nächsten Jahren wird man sich nach Giga für 10^9 und Tera für 10^{12} an weitere exotische Vorsilben gewöhnen ▷

▷ müssen: Peta für 10^{15} und Exa für 10^{18}. Während über Exabyte-Speicher schon gelegentlich gesprochen wird, ist der Petaflops-Computer bis 2010 nicht nur erklärtes Ziel einer Ausschreibung des amerikanischen Verteidigungsministeriums – auch der Überraschungssieger von einst hat seinen Hut in den Ring geworfen. Im Auftrag der japanischen Regierung soll NEC bis 2010 einen Rechner entwickeln, der 10^{15} elementare Operationen in der Sekunde schafft.

Beim Earth Simulator wurde ein anderwärts praktisch aufgegebenes Konzept, der Vektorrechner, verfeinert und zu eindrucksvoller Blüte gebracht (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14). Der neue Rechner soll abermals aus Vektorprozessoren bestehen, die allerdings durch den technischen Fortschritt kleiner und leistungsfähiger sein werden.

Zur Überwindung der Petaflops-Marke wollen die Japaner mit bescheidenen 8192 Stück davon auskommen. Dazu müsste jeder Prozessor einige hundert Gigaflops leisten – ein Ziel, das NEC durch viele kleine Fortschritte zu erreichen hofft. Die Kommunikation zwischen den Einzelrechnern nimmt allerdings derart gigantische Ausmaße an – zwanzig Terabyte pro Sekunde und Prozessor gegenüber einem Terabyte bei heutiger Technologie –, dass sie nur noch durch optische Datenübertragung zu bewältigen ist (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 94). Dieser Sprung um den Faktor zwanzig wird noch großen Forschungsaufwand erfordern.

Es bleibt also spannend.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

HALBLEITERTECHNIK

Chip mit Ohr

US-Wissenschaftlern ist es gelungen, aus Silizium ein funktionierendes Innenohr herzustellen.

Von Stefan Maier

Dieser Tage geht es laut zu in den Labors von Robert White und Karl Grosh an der Universität von Michigan in Ann Arbor. Kleine Lautsprecher beschallen oft stundenlang nur wenige Quadratzentimeter große Chips aus Silizium, als ob diese mit Ohren ausgestattet wären. Und das sind sie tatsächlich.

Jede der kleinen Siliziumplatten beherbergt eine lebensgroße, funktionsfähige Replik des menschlichen Innenohrs, die ganz mit moderner Halbleitertechnologie hergestellt wurde. Das Fertigungsverfahren eignet sich somit gut für die Massenproduktion. Die beiden Forscher hoffen deshalb, dass aus ihren Chips mit Ohren bald Hörhilfen werden, die tauben Patienten die Welt der Laute und Töne authentisch erschließen *(Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 102, S. 1296)*.

Die Natur als Vorbild

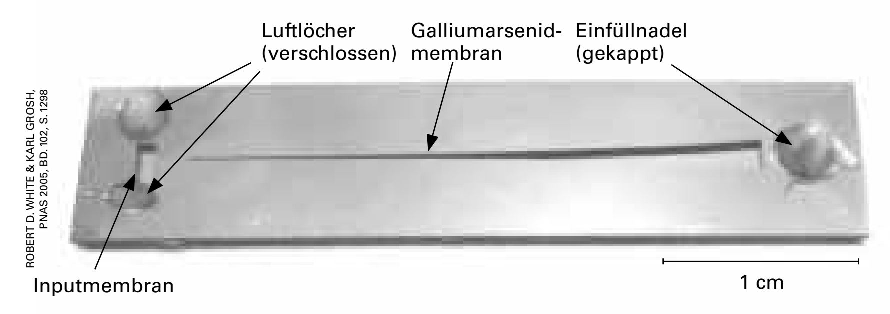
Zwar gibt es schon seit zwei Jahrzehnten elektronische Cochlea-Implantate, die durch ein winziges Mikrofon aufgefangene Schallwellen in elektrische Impulse umwandeln, um so den Hörnerv zu stimulieren. Allerdings sind diese Geräte, obwohl sie akustische Informationen wahrnehmbar machen und vielen Hörgeschädigten dadurch das Leben erleichtern, nur ein dürftiger Ersatz des normalen Sinnesorgans und haben vor allem nicht viel mit der Natur zu tun. White und Grosh hingegen wollen mit ihren Chips die Funktionsweise des biologischen Vorbilds möglichst genau nachbilden. Und dazu gilt es, sie erst einmal im Detail zu ergründen. Denn da verbirgt sich noch so manches Geheimnis.

Wenn Schallwellen von der Ohrmuschel aufgefangen werden und sich durch das Außen- zum Mittelohr fortpflanzen, versetzen sie zunächst das Trommelfell in Schwingungen (Bild unten). Gehörknöchelchen leiten die Vibrationen an das Innenohr weiter. Dieses besteht bei Säugetieren aus einer Art sich verengendem Schlauch, der mit Lymphflüssigkeit gefüllt und zur einer Spirale gewunden ist – weshalb er Schnecke genannt wird. Eine dünne »Basilarmembran« teilt ihn der Länge nach in zwei Hälften.

Das innerste Gehörknöchelchen – der Steigbügel – zerrt unten an dem Schlauch und erzeugt so Druckschwankungen in der Lymphflüssigkeit. Dadurch wird die Membran zu Vibrationen angeregt, die in Form von Wanderwellen an ihr entlanglaufen. Winzige Haarzellen auf der Membranoberfläche registrieren diese Wellen und verwandeln sie in elektrische Impulse, die der Hörnerv dann an das Gehirn weiterleitet. Dort findet schließlich die Wahrnehmung statt.

Gehörknöchelchen
Cochlea
Trommelfell
SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

◀ Im menschlichen Ohr wandelt das Trommelfell Schallwellen in mechanische Schwingungen um, die über die Gehörknöchelchen zur schneckenförmigen Cochlea geleitet und dort einer Frequenzanalyse unterzogen werden.



US-Forscher erzeugten auf einem Chip eine künstliche Cochlea. Dazu ätzten sie in ein Siliziumplättchen einen sich verbreiternden Kanal, den sie mit einer Membran aus Galliumarsenid überzogen und mit Silikonöl füllten. Tatsächlich konnte diese »entrollte« Schnecke eine Frequenzanalyse von Schallwellen durchführen, die über eine Inputmembran eingespeist wurden.

Während Außen- und Mittelohr dazu dienen, die Schallwellen in mechanische Schwingungen umzuwandeln, fungiert die Schnecke als Frequenzfilter, der komplexe Klänge in ihre einfachen, sinusförmigen Bestandteile zerlegt. Sowohl die Breite als auch die Dicke der Basilarmembran variieren nämlich über die Länge des Innenohrkanals hinweg. Dadurch ändert sich der mechanische Widerstand von Ort zu Ort. Dies hat zur Folge, dass die Wanderwellen je nach ihren Frequenzen an einer anderen Stelle ihre maximale Amplitude erreichen – solche mit hohen Frequenzen (hohe Töne) schon kurz nach dem Eingang der Schnecke, niederfrequente dagegen erst weiter hinten.

Je nach Tonhöhe werden also Haarzellen an verschiedenen Orten angeregt. Dadurch gelingt es dem Innenohr, komplexe akustische Schwingungen in die zu Grunde liegenden Sinuswellen zu zerlegen und deren Frequenzen zu ermitteln. Die von White und Grosh hergestellte Prothese funktioniert genau nach demselben Prinzip.

Um sich die Aufgabe zu erleichtern, rollten die Forscher die Schnecke allerdings auf und erzeugten einen geradlinigen, sich verbreiternden Flüssigkeitskanal (Bild oben). Dazu setzten sie ein aus der Halbleiterindustrie bekanntes Ätzverfahren ein, bei dem ungeschützte Stellen einer kleinen Siliziumplatte mittels reaktiver Ionengase entfernt werden. Als Basilarmembran diente eine dünne Schicht aus Siliziumnitrid, die sich von etwa 0,14 auf 1,82 Millimeter verbreitert. Den Kanal füllten White und Grosh mit Silikonöl.

Nun kam der spannende Test. Die Forscher beschallten den Kanal mit Überlagerungen aus Sinuswellen verschiedener Frequenzen. Zugleich maßen sie per Laserstrahl die Amplitude der vertikalen Schwingungen entlang der Membran. Diese wurde, wie sie erfreut feststellten, genau an den erwarteten Stellen maximal. Das künstliche Innenohr konnte die zusammengesetzte Schallwelle also tatsächlich in ihre Frequenzanteile zerlegen.

Auf die Steifigkeit kommt es an

Inzwischen haben White und Grosh mit ihren hörenden Chips schon einiges über die Einzelheiten der Frequenzfilterung gelernt. Damit diese gut funktioniert, muss die verwendete Flüssigkeit zum Beispiel relativ zähflüssig sein – einfaches Wasser tut es nicht. Zudem verbessert sich die Auflösung des Filters, wenn die Membran ihrer Breite nach steifer ist als ihrer Länge nach. Um dies zu erreichen, brachten die Forscher winzige Balken aus Kunststoff darauf an. Wie aus Untersuchungen der Ohren von Säugetieren bekannt ist, weist auch die natürliche Basilarmembran eine derartige Anisotropie auf.

Allerdings scheint die Natur den Nachahmern immer noch einen Schritt voraus zu sein. Die Frequenzauflösung des hörenden Chips reicht bisher bei Weitem nicht an die der altbekannten Schnecke im Wirbeltierohr heran. Der Grund dafür ist noch unklar. Vielleicht müssen die Forscher nur die Steifheit der Membran weiter modifizieren. Im ungünstigsten Falle könnte es aber auch sein, dass die Natur andere, bisher unerkannte Tricks einsetzt.

Es bleibt also noch viel zu tun. Als Nächstes wollen White und Grosh ihren Chip mit Sensoren ausstatten, welche die Vibrationen in elektrische Signale umwandeln. Ob das Silizium-Ohr jemals die Qualität der auf Mikrofonen und Digitalisierung beruhenden Cochlea-Implantate erreichen wird, ist derzeit noch fraglich. Doch sind die Forscher mit seiner Hilfe ihrem Ziel, dem Gehör seine letzten Geheimnisse zu entlocken, einen großen Schritt näher gekommen. Außerdem sehen sie für ihr Gerät auch eine technische Anwendung als preiswerter Frequenzanalysator mit geringem Energieverbrauch.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

ASTRONOMIE

Kosmisches Kälteloch

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

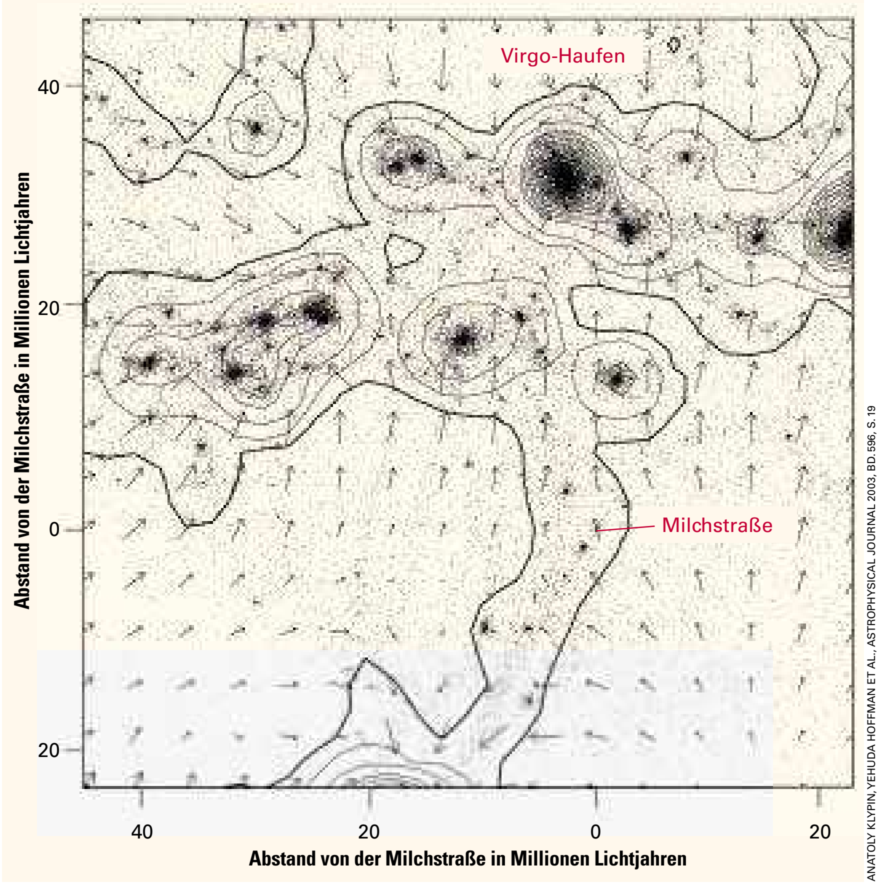
Weht in unserer kosmischen Nachbarschaft der kalte Hauch der Dunklen Energie?

Von George Musser

Auf den ersten Blick hat die Dunkle Energie einen diskreten Charme. Als schillernder Fremdling im Standardmodell der Physik betrat sie vor einem Jahrzehnt die kosmologische Bühne und eroberte die Herzen der Himmelsforscher im Sturm, indem sie alle möglichen Probleme im Handstreich löste – zum Beispiel die Diskrepanz zwischen dem Alter des Universums und der kosmischen Materiedichte. Die Expansion des Alls erhielt neuen Schwung: Statt allmählich zu erlahmen, wie zuvor gedacht, gewinnt sie nun sogar stetig an Fahrt.

Inzwischen geht den Astronomen jedoch auf, dass die Dunkle Energie auch ihre Schattenseiten hat. Mit dem kalten Griff ihrer abstoßenden Kraft drosselt sie die Bildung großer kosmischer Strukturen. Und jetzt streckt sie ihre Arme sogar nach der unmittelbaren Umgebung unserer Heimatgalaxie aus. »Man muss gar nicht weit gehen, um auf die Dunkle Energie zu stoßen«, sagt Andrea Macciò von der Universität Zürich. »Sie ist ganz in unserer Nähe.«

Bis vor Kurzem richteten die Spezialisten für exotische Phänomene im All – sei es die Dunkle Energie oder die ebenso unsichtbare Dunkle Materie – den ▷



Die Milchstraße und ihre kosmischen Nachbarn driften en bloc auf den Virgo-Haufen zu (Pfeile). Relativ zueinander bewegen sie sich dagegen kaum – vielleicht auf Grund des Wirkens der Dunklen Energie.

▷ Blick auf die allergrößten Strukturen (von Galaxienhaufen aufwärts) oder auf relativ kleine Gebilde (einzelne Galaxien). Der Bereich dazwischen wurde dagegen kaum erforscht. Das gilt auch für die kosmische Nachbarschaft unserer eigenen Galaxie. Die Milchstraße gehört zur Lokalen Gruppe, die ihrerseits Teil des Lokalen Volumens ist. Dessen Radius beträgt etwa 30 Millionen Lichtjahre. Alle Sternsysteme in diesem Raumgebiet treiben en bloc mit einer Geschwindigkeit von etwa 600 Kilometern pro Sekunde durchs All, angezogen vom Virgo-Galaxienhaufen und anderen fernen Massen.

Dabei erstaunt die Gleichförmigkeit dieser Drift. Schon in den 1970er Jahren entdeckten Allan Sandage von den Carnegie-Observatorien und andere, dass die Relativbewegungen innerhalb des Lokalen Volumens ziemlich gering sind: Sie betragen im Mittel nur 75 Kilometer pro Sekunde. Jüngste Analysen haben dieses Ergebnis, das hochpräzise Messungen von Abständen und Geschwindigkeiten erfordert, in den Grundzügen bestätigt.

See aus Dunkler Materie?

Computersimulationen zufolge sollten benachbarte Galaxien unter dem Einfluss ihrer wechselseitigen Gravitation jedoch mit fast 500 Kilometern pro Sekunde umhersausen. Thermodynamisch betrachtet – das heißt in Analogie zu einem Pulk durcheinander schwirrender Gasatome – ist das Lokale Volumen somit erstaunlich »kalt«.

Man kann das Problem auch aus dem Blickwinkel der kosmischen Expansion betrachten. Laut Theorie sollte erst in Größenmaßstäben von einigen 100 Millionen Lichtjahren, wo die Materie zufällig verteilt statt kleinräumig strukturiert erscheint, die allgemeine Ausdehnungstendenz über die örtlichen Bewegungen dominieren. Im Lokalen Volumen dagegen geschieht das schon bei Abständen von 5 Millionen Lichtjahren.

Igor Karachentsev von der Russischen Akademie der Wissenschaften vermutet als Grund dafür, dass Galaxien und ihre jeweiligen Kokons aus Dunkler Materie ihrerseits in einem See aus Dunkler Materie schwimmen. Ein solcher See würde die Dichteunterschiede zwischen den Sternsystemen verringern und damit die Gravitationskräfte abschwächen, die für die Relativbewegungen der Galaxien sorgen. Der Haken an der Sache ist nur, dass Materie – gleich ob sichtbar oder dunkel – sich nicht zu einem See ausbreiten, sondern zu Klumpen zusammenballen sollte.

Deshalb suchen andere Theoretiker die Erklärung für die ungewöhliche Kälte des Lokalen Volumens in der Dunklen Energie. Deren Abstoßungseffekt könnte die Schwereanziehung zwischen den Galaxien kompensieren und so die Relativbewegung der Sternsysteme dämpfen. Innerhalb und in der Nähe der Milchstraße behält zwar die Anziehung die Oberhand, aber jenseits einer bestimmten Entfernung dominiert die Abstoßung. Schon vor fünf Jahren haben Arthur Chernin und seine Kollegen an der Universität Moskau berechnet, dass diese Distanz 5 Millionen Lichtjahre beträgt – genau der Abstand, bei dem die Galaxienbewegungen von den Vorhersagen der Standardmodelle abweichen.

Die Berechnungen der russischen Forscher halbierten die galaktischen Geschwindigkeiten allerdings nur, was nicht genug ist. Nun dagegen lieferten neue, aufwändigere Simulationen durch Macciòs Gruppe ein zufrieden stellendes Ergebnis. »Wenn und nur wenn man die Dunkle Energie einbezieht, gibt es eine sehr gute Übereinstimmung«, beteuert die Züricher Forscherin. »Aus diesem Grund behaupten wir, die Signatur der Dunklen Energie gefunden zu haben.«

Doch nicht jeder ist dieser Meinung. Schon 1999 vertraten Rien van de Weygaert von der Universität Groningen und Yehuda Hoffman von der Hebräischen Universität in Jerusalem die Ansicht, dass das Lokale Volumen Opfer eines kosmischen Tauziehens zwischen den umgebenden Galaxienhaufen sei. Das Gerangel würde an den Sternsystemen zerren und ihre gegenseitige Anziehung verringern.

Die Streitfrage lässt sich nur entscheiden, wenn man das Lokale Volumen mit ähnlichen Regionen vergleicht. Falls sich Gebiete, in denen kein Tauziehen stattfindet, genauso verhalten wie das Lokale Volumen, muss die Dunkle Energie dahinter stecken. Leider können sich die Teams nicht einigen, was »ähnlich« heißt. Die Debatte geht also weiter. Nur so viel steht fest: Sollte sich Macciòs Erklärung durchsetzen, wäre uns die Dunkle Energie – bisher nur eine ferne, abstrakte Kraft ohne irdischen Bezug – plötzlich ziemlich dicht auf die Pelle gerückt.

George Musser ist Physiker und Redakteur bei Scientific American.

MEDIZIN

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Vom Frauen- zum Vertrauenshormon

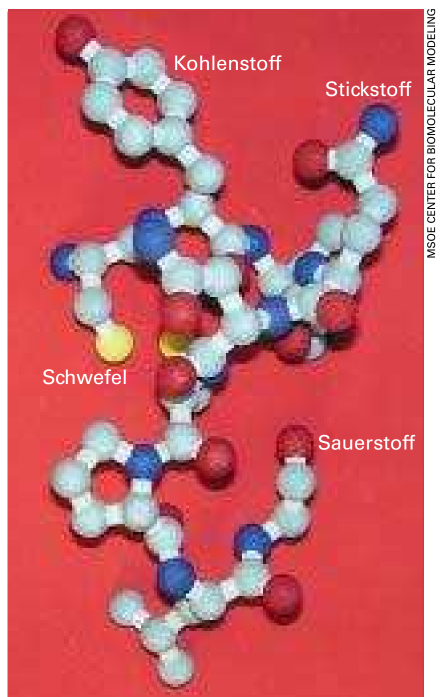
Bisher half Oxytocin Müttern mit Stillproblemen. Nach jüngsten Versuchen scheint es jedoch auch bei Männern zu wirken: Es macht sie vertrauensseliger gegenüber Geschäftspartnern.

Von Suzann-Viola Renninger

Autark und frei von äußeren Zwängen all seine Entscheidungen fällen zu können – diesen Wunschtraum hegt wohl jeder Mensch. Vielleicht ist das der Grund, weshalb das Medienecho immer dann besonders stark ausfällt, wenn die Wissenschaft geheime Mechanismen aufdeckt, die unser soziales Verhalten steuern. Das bestätigte sich jetzt erneut, als Ergebnisse eines Laborexperiments publik wurden, welche den Einfluss des vor allem als Frauenhormon bekannten Oxytocins auf Investitionsentscheidungen von Männern belegten *(Nature, Bd. 435, S. 673)*. Sofort befürchteten Journalisten rund um die Welt, damit sei ein neues Kapitel zu unkontrollierbaren Manipulationen von Kauf- und Vertragsentscheidungen aufgeschlagen worden. Dabei waren die Fakten eher harmlos: Ein Forscherteam an der Universität Zürich hatte erstmals experimentell gezeigt, dass Oxytocin das Vertrauen in unklare soziale Situationen erhöhen kann.

Das Experiment entsprang einer ungewöhnlichen Kooperation zwischen dem Wirtschaftswissenschaftlichen und dem Psychologischen Institut. Die Erfahrung mit dem Hormon brachte der klinische Psychologe Markus Heinrichs mit. In vielen Untersuchungen hatte er in den vergangenen Jahren gezeigt, dass Oxytocin Menschen helfen kann, gelassener mit schwierigen sozialen Situationen umzugehen. Das Hormon wurde dabei mit einem Fläschchen tief in die Nase gespritzt und konnte von dort aus die Blut-Hirn-Schranke überwinden.

▼ **Oxytocin ist ein Peptid aus nur neun Aminosäuren und wird als Hormon im Gehirn gebildet.**



MSOE CENTER FOR BIOMOLECULAR MODELING

Droge gegen Schüchternheit

Heinrichs ließ sich auch von praktischen Gesichtspunkten leiten. Da er neben seiner Forschertätigkeit eine psychotherapeutische Sprechstunde betreibt, konnte er das Hormon an Patienten erproben, die an Sozialphobie leiden. Diese krankhafte Schüchternheit gilt nach Alkoholismus und Depression als dritthäufigste psychische Störung und kann schon den Gang zum Zeitungskauf am Kiosk zu einer Höllentour werden lassen. Derzeit erprobt Heinrichs bei seinen Patienten eine Kombination aus Verhaltenstherapie und Verabreichung von Oxytocin. Nach ersten Ergebnissen scheint das geschnupfte Hormon den Betroffenen zu helfen, ihre Schwellenangst zu überwinden und sich auf die Gespräche in der Therapiegruppe einzulassen. Auch die Ruhe, mit der stillende Frauen sich ihrem Kind widmen können, ist wahrscheinlich auf die erhöhten Oxytocinwerte in ihrem Gehirn zurückzuführen.

Die ökonomische Seite in dem interdisziplinären Team vertraten Ernst Fehr und Michael Kosfeld. Die beiden Wirtschaftswissenschaftler analysieren mit Hilfe von Laborexperimenten das Entscheidungsverhalten von Menschen im ▷

▷ so genannten Gefangenendilemma, bei dem der optimale Ausgang für alle immer dann verfehlt wird, wenn jeder das Beste für sich herausholen möchte. Um den Einfluss von Oxytocin auf die Entscheidungen zu untersuchen, griffen Fehr und Kosfeld auf ein Investitionspiel zurück, das sie schon bei früheren Untersuchungen eingesetzt hatten.

Dabei werden die Versuchsteilnehmer – meist Studenten – nach einer kurzen Einweisung zwei Gruppen zugeteilt. Als »Investoren« erhalten die einen die Möglichkeit, Geld in Projekte der anderen zu stecken. Diese »Kreditnehmer« können mit dem investierten Betrag wirtschaften, was unter Laborbedingungen schlicht bedeutet: sich zurücklehnen und abwarten, bis der Versuchsleiter die Summe verdreifacht. Danach können die Kreditnehmer entscheiden, wie viel sie von diesem Gewinn an den Investor zurückgeben – oder ob sie sogar alles, einschließlich des Kredits, für sich behalten.

Sanktionen von den Mitspielern müssen sie bei diesem Experiment nicht befürchten. Isoliert in kleinen Boxen, bleiben Kreditgeber und -nehmer anonym. Sie kommunizieren über die standardisierte Eingabemaske eines Computers und haben keine Möglichkeit sich abzusprechen. Sollte sich der Empfänger mit dem Geld auf Nimmerwiedersehen davonmachen, kann der Kreditgeber nur hilflos mit den Achseln zucken.

Wer auf Nummer sicher gehen will, darf also überhaupt nicht investieren, muss dafür aber auch die Aussicht auf eine mögliche Teilung des ja nicht unerheblichen Gewinns in den Wind schlagen. Wer dagegen investiert, riskiert, dass der Geschäftspartner das Vertrauen missbraucht und nicht teilt. Die Kreditgeber befinden sich daher in einem Dilemma, aus dem sie nur durch einen Vertrauensvorschuss entkommen können.

In dieser Situation führte das Oxytocin zu einem frappierenden Effekt. Sprühten sich die Kreditgeber – eingeladen waren für dieses Experiment nur Männer – fünfzig Minuten vor dem Versuch das Hormon in die Nase, dann investierten sie signifikant höhere Beträge. In dieser Eindeutigkeit überraschte das Ergebnis selbst die Wissenschafter. Hatte das Vertrauen der Kreditgeber unter dem Einfluss des Hormons zugenommen?

Einblicke in die Chemie der Seele

Oxytocin – der Name stammt aus dem Griechischen und bedeutet »schnelle Geburt« – war über viele Jahrzehnte nur aus der Gynäkologie bekannt. Es besteht aus neun Aminosäuren (Bild S. 21) und wird vor allem vom Nervengewebe des Hypothalamus im Zwischenhirn synthetisiert. Von dort gelangt es in die nahe gelegene Hirnanhangsdrüse. Während der Geburtswehen in den Blutkreislauf entlassen, fördert das Hormon die Kontraktion der Uterusmuskulatur und damit die Geburt. Danach löst es den Milchfluss aus, sobald die Mutter ihr Kind an die Brust nimmt. Frauen mit Problemen beim Stillen erhalten daher oft ein Nasenspray mit Oxytocin verschrieben – dasselbe Präparat, das auch die Züricher Wissenschafter ihren Versuchsteilnehmern zum Schnupfen gaben.

In der Öffentlichkeit ist der Geburts- und Stillhelfer zugleich als Kuschel- oder Treuehormon bekannt. Doch diese schlagzeilenträchtigen Etikettierungen beruhen auf Effekten, die bisher ausschließlich an Tieren beobachtet wurden. Spritzt man weiblichen, nicht trächtigen Schafen das Hormon direkt in die Gehirnventrikel, dann bemuttern sie fremde Lämmer. Und eine gentechnische Manipulation, die für mehr Rezeptoren eines Oxytocinverwandten im Gehirn sorgt, kann bei Mitgliedern einer polygamen Mäuseart bewirken, dass sie lebenslang einem einzigen Partner treu bleiben.

Aus diesen Ergebnissen zu schließen, dass Oxytocin auch bei uns Menschen die partnerschaftliche Verbundenheit fördert und Verliebtheit oder Vertrauen steuert, erscheint allerdings gewagt. Bisher fehlte ein wissenschaftliches Verfahren, die Wirkung des Hormons auf psychische Zustände experimentell nachzuweisen. Im normalen Sprachgebrauch ist klar, was wir mit Vertrauen meinen, objektiv wissenschaftlich aber lässt es sich nur schwer definieren oder gar messen. Diese Lücke beginnt das Züricher Experiment zu füllen.

Allerdings war zunächst noch nicht sicher, ob die größere Investitionsneigung wirklich am gestiegenen Vertrauen lag. Möglicherweise hatte Oxytocin ja schlicht die Risikobereitschaft erhöht. Um das zu prüfen, ersetzten die Züricher Forscher in einem Kontrollexperiment die Kreditnehmer durch Computer, die das Verhalten der Studenten simulierten. Das Risiko der Investoren, in ihren Erwartungen enttäuscht zu werden, blieb also unverändert. Dennoch verlor in dieser Situation das Oxytocin seine Wirkung. Offensichtlich fließt unter dem hormonellen Einfluss die Investition nur bei einem menschlichen Empfänger reichlicher, nicht jedoch bei seinem digitalen Pendant. Oxytocin steigert demnach die Risikobereitschaft ausschließlich dann, wenn Menschen im Spiel sind. Oder anders ausgedrückt: Es erhöht schon vorhandenes Vertrauen in ein menschliches Gegenüber.

Die neuen Ergebnisse sind vor allem für die Grundlagenforschung interessant, unterstreichen aber auch die Eignung von Oxytocin für therapeutische Zwecke. Die Gefahr des Missbrauchs zur gezielten Manipulation scheint dagegen gering. Der Wirkung des Hormonsprays sind nicht nur durch seine kurze Halb-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ **Erhöhte Oxytocinwerte im Gehirn stillender Frauen fördern die liebevolle Zuwendung zum Kind (links). Bei Männern steigert das Hormon, wie sich nun zeigte, das Zutrauen zu Geschäftspartnern (rechts).**

wertszeit enge Grenzen gesetzt. Auch am Anteil der Versuchspersonen, die überhaupt investierten, änderte die Oxytocingabe nichts, allein an der Höhe des riskierten Geldbetrags. Das »Vertrauenshormon« schubst uns daher offenbar nur etwas weiter in die Richtung, die wir ohnehin einschlagen wollen; einen gezielten Richtungswechsel kann es wohl nicht auslösen.

Suzann-Viola Renninger hat Biologie studiert und in Philosophie promoviert. Sie arbeitet als Journalistin und Herausgeberin der »Schweizer Monatshefte«.

Springers EINWÜRFE

von Michael Springer

Pffft – vertrauen Sie mir!

Ein Nasenspray, das Bedenken zerstreut – und weckt

Ohne Kooperation mit anderen könnten wir nicht leben. Jeder Gang über die Straße, jede Autofahrt, jeder Arbeitsschritt, jeder Einkauf setzt Vertrauen in das komplementäre Verhalten von Bekannten und Unbekannten voraus. Aber wie bringen wir dieses Vertrauen auf? Welche neurobiologischen Mechanismen sind dabei im Spiel?

Eine besonders intensive Belohnung für eine spezielle Form intimen Zusammenwirkens ist der gemeinsam herbeigeführte Orgasmus. Unter anderem wird dabei im Gehirn das Hormon Oxytocin ausgeschüttet, das – zumindest im Versuch mit Wühlmäusen – die partnerschaftliche Bindung nach dem Koitus fördert. Der prominente Neurowissenschaftler Antonio Damasio verglich darum in seinem Buch »Descartes' Irrtum« Oxytocin mit dem Liebestrank, der einst Tristan und Isolde sagenhaft aneinander kettete.

Dass diese Substanz Testpersonen in unübersichtlichen Situationen vertrauensvoller stimmt, hat kürzlich ein Team um Michael Kosfeld am Institut für empirische Wirtschaftsforschung der Universität Zürich nachgewiesen (siehe nebenstehenden Bericht). Die Versuchsteilnehmer sollten an Unbekannte Geld verleihen und dabei riskieren, es gar nicht oder nur teilweise zurückzubekommen; im günstigen Fall winkte allerdings ein gehöriger Gewinn. Der Clou des Versuchs: Wurde den potenziellen Kreditgebern vor dem Test per Nasenspray Oxytocin verabreicht, so stieg die gewährte Kreditsumme signifikant.

Die Züricher Studie hat verdientes Aufsehen erregt. Dass eine so grundlegende und komplexe Verhaltensdisposition wie das Vertrauen zu den Mitmenschen durch eine einzelne Substanz derart deutlich beeinflusst werden kann, überrascht doch sehr. Ein Koautor, der Psychotherapeut Markus Heinrichs, erhofft sich davon nun ein Medikament, das gegen Autismus und soziale Phobien hilft.

Zugleich beschleicht einen allerdings die ungute Vorahnung möglichen Missbrauchs. Etwa: Vor einer riskanten Geschäftsvereinbarung wird im Verhandlungsraum Oxytocin versprüht. Die misstrauischen Besucher scherzen beim Eintreten: »Sie blasen doch nicht die neue Vertrauensdroge durch die Klimaanlage?« Der Gastgeber lacht: »So etwas würden wir nie tun, das können Sie uns glauben!« Die Besucher atmen tief durch, lachen vertrauensvoll mit – und unterschreiben …



Dieses Szenario ist zum Glück unrealistisch – wenigstens vorläufig. Oxytocin wirkt nur, wenn es direkt in die Nase gesprüht wird; es durchdringt erst nach fast einer Stunde die Blut-Hirn-Schranke, entfaltet dann seine Wirkung und verliert sie rasch wieder. Ein effektiveres Vertrauenshormon ist noch Zukunftsmusik. Also bleibt etwas Zeit, sich auf Risiken und Nebenwirkungen solcher Substanzen vorzubereiten.

Mythos Selbstbewusstsein

Das Selbstwertgefühl der Bevölkerung zu stärken, gilt in den USA als nationale Aufgabe. Doch im Licht psychologischer Forschung lösen sich die Thesen mancher Förderprogramme in Luft auf.


Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Von Roy F. Baumeister, Jennifer D. Campbell, Joachim I. Krueger und Kathleen D. Vohs

Ein jeder weiß aus eigener Erfahrung, wie wichtig ein starkes Selbstbewusstsein, genauer: ein gutes Selbstwertgefühl, für die psychische Gesundheit ist. Mehr noch: Wer unsicher auftritt, dürfte kaum Erfolg im Beruf haben, Männer mit einem »Minderwertigkeitskomplex« haben im Wettstreit um das andere Geschlecht eher das Nachsehen. Wer solchen pauschalen Einschätzungen glaubt, ist in guter Gesellschaft: Schutz und Stärkung des Selbstwertgefühls gelten in den USA als Angelegenheit von geradezu nationalem Interesse.

Diese Entwicklung begann in den späten 1980er Jahren in Kalifornien, als Gouverneur George Deukmejian eine Arbeitsgruppe zu den Themen Selbstbewusstsein und persönliche sowie gesellschaftliche Verantwortung einsetzte. Initiator war der Abgeordnete und heutige Senator John Vasconcellos, der Jugendkriminalität, Schwangerschaft von Minderjährigen, Drogenmissbrauch, schwache schulische Leistungen und Umweltverschmutzung durch entsprechende psychologische Maßnahmen bekämpfen wollte. Er hoffte sogar, den Staatshaushalt auszugleichen – Bürger mit hoher Selbstachtung sollten mehr Geld als andere verdienen und somit auch mehr Steuern bezahlen. Tatsächlich kam ein Team von Wissenschaftlern in der 1989 veröffentlichten Studie »The Social Importance of Self-Esteem« zu dem Schluss, dass »viele, wenn nicht sogar die meisten der großen gesellschaftlichen Probleme ihre Wurzeln im niedrigen Selbstbewusstsein der Menschen haben«. Erziehungsprogramme und sozialpolitische Projekte wurden ins Leben gerufen. Die gemeinnützige »National Association for Self-Esteem (NASE)« führt die Arbeit der 1995 aufgelösten kalifornischen Gruppe heute weiter.

Eine wirkliche Datenbasis hatten all diese Initiativen aber nicht und das gilt auch noch heute, obwohl mittlerweile wesentlich mehr Studien zu diesem Thema vorliegen. Aus diesem Grund haben wir vier vor einiger Zeit beschlossen, unter der Ägide der Amerikanischen Fachgesellschaft für Psychologie die wissenschaftliche Literatur zu sichten und die verschiedenen unterstellten Korrelationen zu prüfen.

Ein Grundproblem zeigte sich schnell: Wie lässt sich das Selbstwertgefühl messen? In den meisten Untersu- ▷

Wer der Welt selbstbewusst gegenübertritt, dem bleibt Erfolg im Beruf und in den sozialen Kontakten nicht verwehrt, so die gängige Annahme. Doch der wissenschaftliche Beweis dafür fehlt.

MELISSA SZALKOWSKI

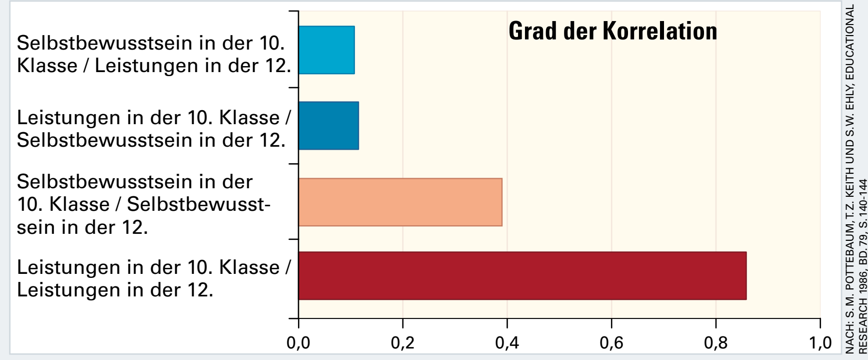


Selbstbewusstsein und schulische Leistungen



STONE

Eine Studie mit Tausenden von High-School-Schülern in der 10. sowie der 12. Klasse belegte nur eine klare Korrelation: Gute Schüler blieben gute Schüler. Ein Zusammenhang von Selbstwertgefühl und schulischer Leistung ließ sich nicht nachweisen.



NACH: S.M. POTTEBAUM, T.Z. KEITH UND S.W. EHLY, EDUCATIONAL RESEARCH 1986, BD. 79, S. 140-144

▷ chungen wurden und werden die Testpersonen nach ihrer eigenen Einschätzung gefragt. Das birgt zwar das Risiko, dass sich der Proband nur besser darstellt, als er sich tatsächlich sieht. Doch leider gibt es keine besseren Verfahren.

Wie fehleranfällig die Methode ist, zeigt schon die Überprüfung der gängigen Annahme, attraktive Menschen hätten ein hohes Selbstwertgefühl. In Tests wurden Personen gebeten, auch ihre körperliche Anziehungskraft zu bewerten. Tatsächlich bestätigen solche Studien zunächst die These und das scheint auch selbstverständlich. Denn gut aussehende Menschen sollten beliebter und begehrter als andere sein, also positive soziale Erfahrungen machen.

Edward F. Diener und Brian Wolsic von der Universität von Illinois und Frank Fujita von der Universität von South Bend (Indiana) führten 1995 eine bemerkenswerte Studie durch. Zuerst ermittelten sie das Selbstbewusstsein einer repräsentativen Stichprobe der Bevölkerung, anschließend wurde jede Testperson dreimal fotografiert: der ganze Körper, nur Kopf und Schultern, und zwar zurechtgemacht und ungeschminkt. Diese Bilder legten sie einer Jury vor und fragten nach der jeweiligen Attraktivität. Lediglich die »geschminkten« Porträtaufnahmen zeigten eine schwache Übereinstimmung von Selbstwerteinschätzung und Bewertung des optischen Eindrucks durch Dritte. Und selbst diese Korrelation löste sich in Luft auf, bewertete die Jury ungeschminkte Gesichter. Das bedeutet im Klartext: Menschen mit hoher Selbsteinschätzung finden sich persönlich vielleicht hinreißend, werden aber nicht unbedingt von anderen so beurteilt.

Menschen mit niedrigem Selbstbewusstsein verallgemeinern ihre Geringschätzung und reden dann nicht nur sich, sondern auch andere schlecht. Das interpretierten Psychologen früher als Voreingenommenheit, diese Personen sollten demnach zu Vorurteilen neigen. Jennifer Crocker von der Universität von Michigan in Ann Arbor stellte diese Deutung in Frage. Wenn ein Mensch mit Minderwertigkeitsgefühlen andere ähnlich bewertet, mag dahinter eine negative Gesamtlebenseinstellung stehen, nicht unbedingt ein Vorurteil gegenüber anderen gesellschaftlichen Gruppen.



Sind von sich überzeugte Schüler im Vorteil?

Angesichts der Vielzahl offenbar nicht solider Untersuchungen legten wir sehr strenge Maßstäbe an, von ursprünglich mehr als 15 000 Publikationen berücksichtigten wir letztlich etwa 200 in unserer zwei Jahre dauernden Metastudie.

Zu Beginn fassten wir Tests zusammen, die eine Verbindung von Selbstwerteinschätzung mit schulischer Leistung prüften. Wir hätten erwartet, dass dieser Zusammenhang eindeutig nachzuweisen ist, das sagt schon der gesunde Menschenverstand: Eine gute Portion Selbstbewusstsein sollte Ehrgeiz und Ausdauer stärken und lähmende Gefühle von Inkompetenz seltener aufkommen

lassen. Ältere Forschungsarbeiten bestätigten diese Annahme, doch in letzter Zeit kamen Zweifel auf. Sheila M. Pottebaum, Timothy Z. Keith und Stewart W. Ehly, alle von der Universität von Iowa, testeten 1986 mehr als 23000 Schüler in der 10. und später noch einmal in der 12. Klasse der High School. Das Ergebnis: Ein hohes oder niedriges Selbstbewusstsein in der 10. Klasse hatte offenbar kaum einen Einfluss auf die schulischen Leistungen in der 12., und umgekehrt korrelierten die schulischen Leistungen in der 10. Klasse nur wenig besser mit der Selbsteinschätzung zwei Jahre später (siehe Kasten links). Andere Studien haben dies inzwischen bestätigt, manche deuten sogar darauf hin, dass ein ausgeprägtes Selbstwertgefühl die Leistungen eher schmälert. Auch für den beruflichen Erfolg, das zeigen entsprechende Untersuchungen, scheint ein gutes Selbstbild nicht unbedingt Voraussetzung zu sein, könnte sogar im Gegenteil wieder negative Konsequenzen haben.

Für den Privatbereich gibt unsere Metastudie ebenfalls wenig Anlass, gezielte Programme zur Stärkung des Selbstbewusstseins aufzulegen. Eigentlich sollte doch jemand mit einem positiven Selbstbild beliebter sein, denn – das suggeriert die alltägliche Erfahrung – Zuversicht und Sicherheit machen attraktiv, Selbstzweifel und Unsicherheit hingegen machen einsam.

So nimmt es denn nicht wunder, dass Personen mit einer hohen Meinung von sich selbst meist die Auskunft geben, bei anderen beliebt zu sein. Ihre Freundschaften beurteilen sie positiver als Personen mit niedrigem Selbstbewusstsein, die häufiger von negativen Erlebnissen und fehlender Unterstützung durch die Gesellschaft sprechen. Laut Julia Bishop und Heidi M. Inderbitzen-Nolan von der Universität von Nebraska-Lincoln spiegeln diese Einschätzungen allerdings nicht die Realität wider. Ihre Befragung von 542 Schülern der 9. Klasse im Jahr 1995 nach den beliebtesten und den unbeliebtesten Mitschülern ergab keinerlei Korrelation mit deren Selbstwertgefühl.

Die frappierende Selbsttäuschung der Selbstbewussten

Andere methodisch fundierte Studien bestätigten dieses Ergebnis auch für Erwachsene. So forschte Duane P. Buhrmester, inzwischen an der Universität von Texas in Dallas, Ende der 1980er Jahre zusammen mit drei Kollegen über das Selbstbewusstsein von College-Studenten. Jene mit hoher Selbstachtung hielten sich auch für offenherziger und glaubten, leichter Kontakte knüpfen zu können als andere. Darüber hinaus gaben sie an, verbalen Angriffen besser standzuhalten, ihren Freunden stärkeren emotionalen Rückhalt zu bieten und auch besser darin zu sein, zwischenmenschliche Konflikte zu lösen. Die Bewertung durch ihre jeweiligen Mitbewohner sprach Bände: Bei vier von fünf der untersuchten Qualitäten fand sich keine aussagekräftige Korrelation mit dem Selbstbewusstsein, einzig beim Knüpfen sozialer Kontakte ist es signifikant von Vorteil (siehe Kasten unten). Wahrscheinlich tun sich Personen, die sich selbst attraktiv finden, einfach leichter darin, Fremde anzusprechen, während Menschen mit geringem Selbstbewusstsein aus Angst vor Zurückweisung oft erst gar keinen Kontakt aufnehmen.

Sollte sich dieser Zusammenhang nicht auch positiv auf das Liebesleben auswirken? Sandra L. Murray von der Universität in Buffalo und vier ihrer Kollegen fanden 2002 heraus, dass Menschen mit niedrigem Selbstbewusstsein dazu neigen, den Liebeserklärungen und der Unterstützung ihres Partners zu misstrauen. Sie erwarten geradezu, zurückgewiesen zu werden. Doch bislang gibt es keinen Nachweis dafür, dass solche Beziehungen besonders zerbrechlich sind. Dagegen fanden Caryl E. Rusbult, Gregory D. Morrow und Dennis J. Johnson 1987 (damals alle an der Universität von Kentucky) heraus, dass Menschen mit einem stark ausgeprägten Selbstwertgefühl weniger bereit sind, Beziehungsprobleme zu lösen, und stattdessen den Partner wechseln. Selbstbewusste Jugendliche haben offenbar – kaum überraschend – weniger Hemmungen, sexuelle Kontakte zu suchen. Machen sie dabei schlechte Erfahrungen, schwächt dies aber umgekehrt ihr Selbstbild.

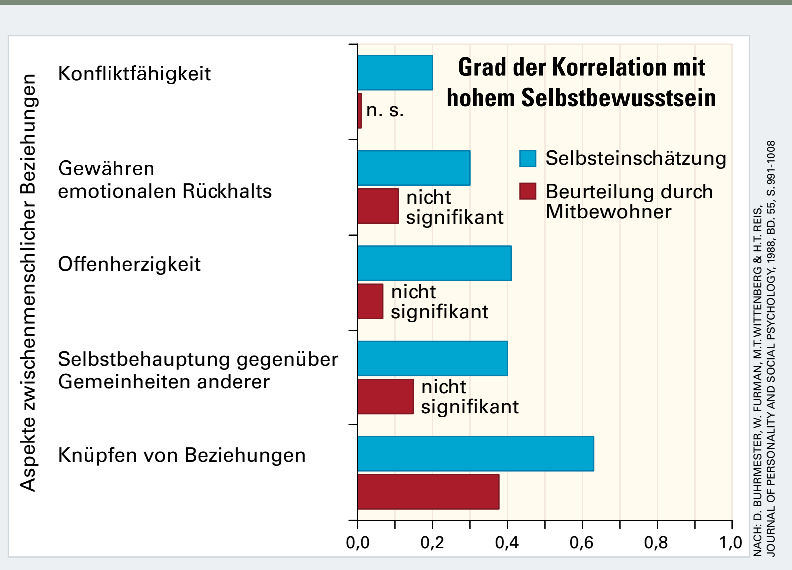
Apropos Jugend: Zu den Besorgnis erregenden Entwicklungen unserer Zeit gehört der immer früher einsetzende Missbrauch von Alkohol oder Drogen. Viele Kollegen glauben, eine Stärkung ▷

Selbstbewusstsein und Beziehungen

Eine Studie unter College-Studenten ergab eine starke Verbindung des Selbstbewusstseins mit verschiedenen Aspekten zwischenmenschlicher Beziehungen, sofern sich die Probanden selbst beurteilten. Die Bewertung durch Mitbewohner ergab teilweise ein anderes Bild.



CORBIS / RANDY FARIS



NACH: D. BUHRMESTER, W. FURMAN, M.T. WITTENBERG & H.T. REIS, JOURNAL OF PERSONALITY AND SOCIAL PSYCHOLOGY, 1988, BD. 55, S. 991-1008

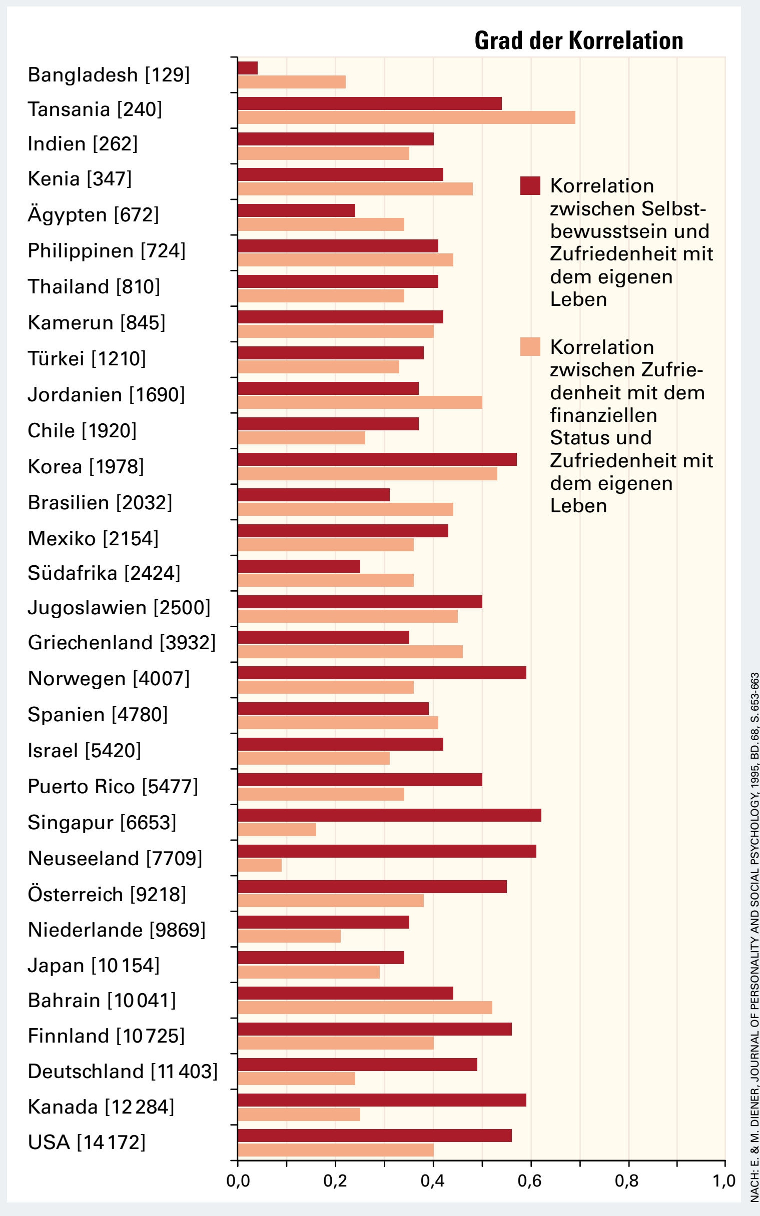
▷ des Selbstwertgefühls wirke dem entgegen. Entsprechende Studien ergeben aber kein einheitliches Bild. Manche bestätigen die Annahmen, dass Teenager mit Minderwertigkeitsgefühlen im Alkohol Trost suchen, andere kommen sogar zu dem gegenteiligen Schluss, dass gerade sehr selbstbewusste Jugendliche den Rausch suchen. Rob McGee und Sheila M. Williams von der medizinischen Fakultät der Otago-Universität in Neuseeland fanden im Rahmen einer groß angelegten Studie im Jahr 2000 keine Korrelation zwischen dem Selbstbewusstsein von 9- bis 13-Jährigen und einem späteren Alkoholmissbrauch im Alter von 15 Jahren. Dies galt auch für den Drogenkonsum. Demgegenüber entdeckten Judy A. Andrews und Susan C. Duncan vom Oregon-Forschungsinstitut drei Jahre zuvor, dass sinkende Motivation in der Schule – Hauptfokus ihrer Untersuchung – das Selbstwertgefühl schwächt und dieser Effekt dem Marihuana-Konsum Vorschub leistet. Allerdings erwies sich der Zusammenhang als relativ schwach.

Unklare Befunde

Wie valide diese Befunde zum Alkohol- und Drogenmissbrauch sind, lässt sich aber nur schwer sagen, denn die Motivation der Probanden wurde nicht berücksichtigt: Nahmen sie aus Neugierde an den Tests teil oder erhofften sie sich einen Vorteil, und sei es, einer als unbefriedigend erlebten Schulsituation kurz entfliehen zu können? Letztlich lässt sich hier keine klare Aussage machen.

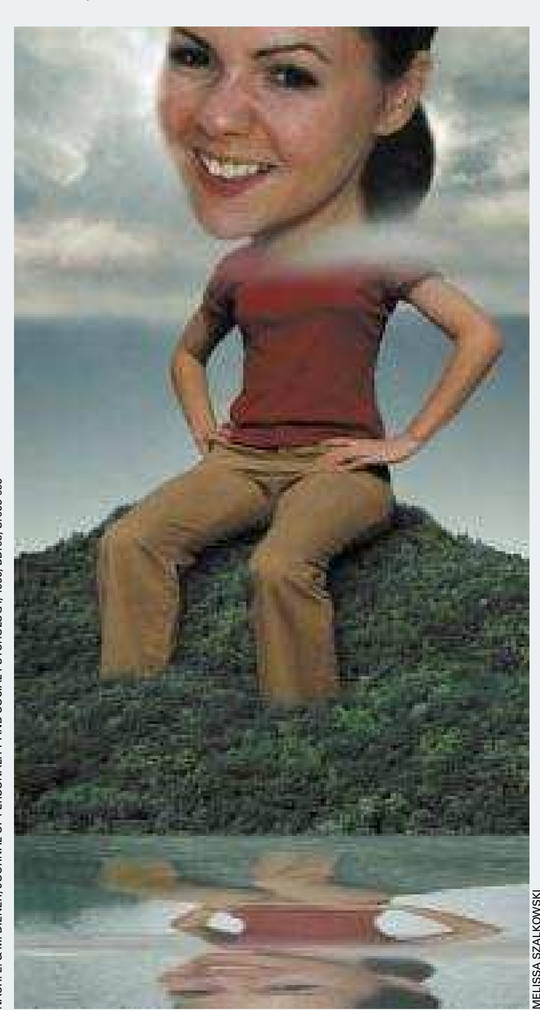
Das Gleiche gilt für Studien zum Rauchen, die meist keinen Einfluss des Selbstbewusstseins bewiesen. Die wenigen Ausnahmen lassen sich durch systematische Mängel der Studien erklären. Zum Beispiel unterschieden Wissenschaftler selten zwischen Personen mit gesunder Selbstachtung, ausgesprochenen Narzisten und Menschen, die ein hohes Selbstbewusstsein lediglich vor-

Selbstbewusstsein und Zufriedenheit



NACH: E. & M. DIENER, JOURNAL OF PERSONALITY AND SOCIAL PSYCHOLOGY, 1995, BD. 68, S. 653-663

Weltweit geht die Lebenszufriedenheit offenbar Hand in Hand mit dem Selbstwertgefühl. In den meisten Ländern ist diese Korrelation sogar deutlich ausgeprägter als die mit der Zufriedenheit über den finanziellen Status (Zahlen in Klammern: Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt in Dollar).



MELISSA SZALKOWSKI

gaukeln. Da erstaunen widersprüchliche Ergebnisse nicht.

Jahrzehntelang glaubten Psychologen, dass Aggressivität in einem geringen Selbstwertgefühl wurzelt. Baumeister, einer von uns, stellte diese Aussage 1996 in Zweifel, da ihm verschiedene Studien zeigten, dass Gewaltverbrecher im Allgemeinen eine hohe und vielleicht sogar überzogene Meinung von sich selbst haben. Dan Olweus von der Universität Bergen in Norwegen untersuchte eine vergleichsweise harmlose Form der Aggression, das Herumkommandieren von Kindern untereinander. Die kleinen Despoten erwiesen sich als selbstsicherer und weniger ängstlich als andere Kinder.

Nach all diesen schlechten Nachrichten haben wir auch eine gute: Menschen mit hohem Selbstbewusstsein sind ganz eindeutig wesentlich glücklicher als andere und neigen dementsprechend seltener zu deprimierter Stimmung. Eine besonders überzeugende Studie dazu veröffentlichten 1995 der schon genannte Edward F. Diener von der Universität von Illinois und seine Tochter Marissa, inzwischen Psychologin an der Universität von Utah. Mehr als 13000 College-Studenten hatten an der Untersuchung teilgenommen. Ein hohes Selbstbewusstsein förderte offenbar die Zufriedenheit mit dem eigenen Leben. Das bestätigte auch eine Erhebung mit mehr als 600 Erwachsenen im Alter zwischen 51 und 95 Jahren durch Sonja Lyubomirsky, Chris Tkach und M. Robin DiMatteo von der Universität von Kalifornien in Riverside.

Die Statistik allein erklärt keine Zusammenhänge

Doch Euphorie wäre noch verfrüht, weitere Studien sind erforderlich. Zum Beispiel belegt eine Korrelation noch nicht automatisch auch einen kausalen Zusammenhang. Es ist gut möglich, dass Erfolg im Beruf, in der Schule oder in der Beziehung Zufriedenheit und Selbstbewusstsein zur Folge hat, umgekehrt Versagen in Unglücklichsein und Minderwertigkeitsgefühlen mündet. Möglicherweise bringt vielleicht auch eine optimistische, lebensbejahende Grundhaltung hohes Selbstbewusstsein hervor.

Natürlich ist auch der Umkehrschluss möglich: Mancher »gebürtige« Pessimist sieht sich und Aspekte seines Lebens vermutlich in schlechtem Licht. Das verweist auf dasselbe methodische Problem, das wir eingangs schon angeführt hatten: Zufriedenheit und ihr Gegenstück, die Niedergeschlagenheit, werden durch Befragung der Probanden nach ihrer eigenen Einschätzung erhoben. Tatsächlich wäre es zum Beispiel schwer zu prüfen, ob jemand seine Zufriedenheit falsch einschätzt. Auch hier müssen wir leider konstatieren, dass eine objektivere Methode nicht zur Verfügung steht.

Was aber ist die Konsequenz unserer Metastudie? Wir fanden durchaus Hinweise darauf, dass Selbstbewusstsein hilfreich ist. Es verbessert das Durchhaltevermögen bei Rückschlägen, und zudem hat sich gezeigt, dass Leute mit hohem Selbstwertgefühl in Gruppen manchmal besser zurechtkommen. Ein negatives Selbstbild gilt darüber hinaus als Risikofaktor für verschiedene Essstörungen, insbesondere Bulimie, wie Vohs, eine von uns, und ihre Kollegen 1999 festgestellt hat. Ein Zusammenhang mit der Lebenszufriedenheit, wie auch immer er geartet ist, lässt sich wohl nicht von der Hand weisen.

Doch Vorsicht, auch wenn eine gute Portion Selbstbewusstsein somit für einen jeden von uns durchaus wertvoll sein kann: Wir haben kaum Hinweise darauf gefunden, dass eine Stärkung der eigenen Wertschätzung auch vor dem Hintergrund der Gesellschaft vorteilhaft ist. Alkohol- und Drogenmissbrauch, Neigung zur Gewalt – es wäre schön, wenn wir bestätigen könnten, dass all diese Probleme nicht mehr erforderten als Zuspruch in den entsprechenden Förderprogrammen. Doch leider reicht das nicht, ebenso wenig wie die wirtschaftliche Kraft irgendeines Landes vom Selbstwertgefühl seiner Berufstätigen allein abhängt. ◁

Verantwortung verbessert Leistung

Donelson R. Forsyth und Natalie A. Kerr von der Virginia Commonwealth University testeten 1999, ob es sinnvoll ist, das Selbstbewusstsein bei Studenten mit schlechten Leistungen gezielt zu stärken. Mit dem überraschenden Resultat, dass dieser Schuss nach hinten losgehen kann.

Die Testpersonen waren Studenten aus einem College-Kurs im Fach Psychologie. Jene mit guten und schlechten Bewertungen wurden so in zwei Gruppen aufgeteilt, dass jede zu Beginn den gleichen Notendurchschnitt aufwies. Studenten der ersten Gruppe erhielten jede Woche eine E-Mail, die ihr Selbstbewusstsein stärken sollte. Die Nachricht für die Mitglieder von Gruppe 2 unterstrich die persönliche Verantwortung für ihre Leistungen.

Am Ende des Kurses war der Leistungsdurchschnitt der ersten Gruppe so stark gesunken, dass das Kursziel nicht erreicht wurde, während die Gruppe 2 mit einem »schlecht, aber gerade noch bestanden« davonkam.

Andere Studien, die ihre Probanden baten aufzuschreiben, was ihnen im Zusammenhang mit Prüfungen durch den Kopf ging, werfen wieder ein anderes Licht auf das Thema. Studenten, die sich verbesserten, dachten: »Ich kann stolz auf mich sein« oder einfach »Ich kann das«. Kommilitonen, die sich nicht verbesserten, notierten hingegen: »Ich schäme mich« oder »Ich bin wertlos«. Noch eindrucksvoller war die Tendenz, Verantwortung für die Ergebnisse zu übernehmen. Während Erfolgreichen durch den Kopf ging »Ich kann den Stoff lernen, wenn ich mich nur anstrenge«, dachten andere mit schlechten Noten »Der Test war zu schwierig«.

Autoren und Literaturhinweise







Roy F. Baumeister lehrt Psychologie an der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada). **Jennifer D. Campbell** (ohne Bild) ist emeritierte Professorin dieser Hochschule. **Joachim I. Krueger** hält eine Professur für Psychologie an der Brown Universität. **Kathleen D. Vohs** ist Forschungsvorsitzende im Bereich Marketingwissenschaften und Konsumentenpsychologie der Sauder School of Business an der Universität von British Columbia.

Does high self-esteem cause better performance, interpersonal success, happiness, or healthier lifestyles? Von Roy F. Baumeister et al. in: Psychological Science in the Public Interest, Bd. 4, Nr.1, S. 1, Mai 2003

Gewalttätig aus Größenwahn. Von Roy F. Baumeister in: Spektrum der Wissenschaft, September 2001, S. 70

Die Zukunft des Wetters



CORBIS / NASA

INHALT

... ist heute so zuverlässig vorhersagbar wie nie. Einen wichtigen Beitrag dazu leisten moderne Wettersatelliten, indem sie die Datenbasis für Vorhersagemodelle erheblich erweitern. Aber die Meteorologen streben nach mehr. Schon gibt es für Europa erste Prognosen, wie die kommende Jahreszeit ausfallen wird. Auch der Schritt von der bloßen Vorhersage des Wetters zu seiner Beeinflussung scheint nicht mehr utopisch: Der Computer zeigt, wie es geht – jedenfalls im Prinzip.

Diesen Hurrikan mit einem gut entwickelten Auge fotografierten Astronauten an Bord der Raumfähre Atlantis im November 1994.

Hurrikane an der Leine

Im Computer gelingt es schon, tropische Wirbelstürme abzuschwächen oder ihre Zugbahn zu ändern. Die Simulationen zeigen, welche Eingriffe auch in der Realität Erfolg versprechen könnten.

Von Ross N. Hoffman

Gewaltige Wirbelstürme mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 120 Kilometer pro Stunde fegen jedes Jahr über die tropischen Meere hinweg. Über dem Atlantik und dem östlichen Teil des Pazifischen Ozeans heißen sie Hurrikane, über dem westlichen Pazifik Taifune und über dem Indischen Ozean Zyklone. Stoßen sie auf die Küste, verwüsten sie häufig weite Landstriche. Wenn die betroffene Region dicht bevölkert ist, können sie Tausende von Menschenleben fordern und Sachschäden in Milliardenhöhe verursachen. Und nichts, absolut nichts vermag sie aufzuhalten.

Aber muss das so bleiben? Werden wir diesen Furcht erregenden Naturgewalten auf ewig hilflos ausgeliefert sein? Meine Forscherkollegen und ich meinen »nein«. Unser Team untersucht derzeit Möglichkeiten, Hurrikane auf weniger schädliche Zugbahnen zu dirigieren oder zu entschärfen. Zwar dürfte es noch einige Jahrzehnte dauern, bis dieses hoch gesteckte Ziel in greifbare Nähe rückt. Doch zeigen die von uns erzielten Ergebnisse, dass es nicht aussichtslos ist, danach zu streben.

Zunächst allerdings müssen wir lernen, den Verlauf eines Sturms absolut präzise vorherzusagen und jene Veränderungen in den physikalischen Bedingungen – wie der Lufttemperatur – zu erkennen, die sein Verhalten beeinflussen. Erst dann können wir nach Wegen suchen, solche Veränderungen künstlich herbeizuführen. Die entsprechenden Untersuchungen stecken noch in den Anfängen, aber erfolgreiche Computersimulationen von Hurrikanen in den letzten Jahren wecken berechtigte Hoffnungen, dass die Einflussnahme eines Tages gelingen könnte. Dabei erweist sich genau das, was Wettervorhersagen so schwierig macht – die extreme Empfindlichkeit der Atmosphäre gegenüber kleinsten Störungen – als Schlüssel zur Beherrschung schwerer tropischer Wirbelstürme. So verlief unser erster Versuch, den Verlauf eines simulierten Hurrikans durch geringfügiges Abändern des Anfangszustands zu beeinflussen, bereits erfolgreich, und auch die weiteren Ergebnisse kann man nur als viel versprechend bezeichnen.

Um zu verstehen, warum und wie es gelingen könnte schwere tropische Stürme zu beeinflussen, muss man sich zunächst einige grundlegende Fakten klar machen. Die Ozeane in den Tropen geben kontinuierlich Wärme und Feuchtigkeit an die Atmosphäre ab, wodurch sich über ihrer Oberfläche eine feuchtwarme Luftmasse ansammelt. Steigt diese auf, kondensiert der enthaltene Wasserdampf: Tröpfchen scheiden sich aus und bilden Wolken, aus denen Niederschlag fällt.

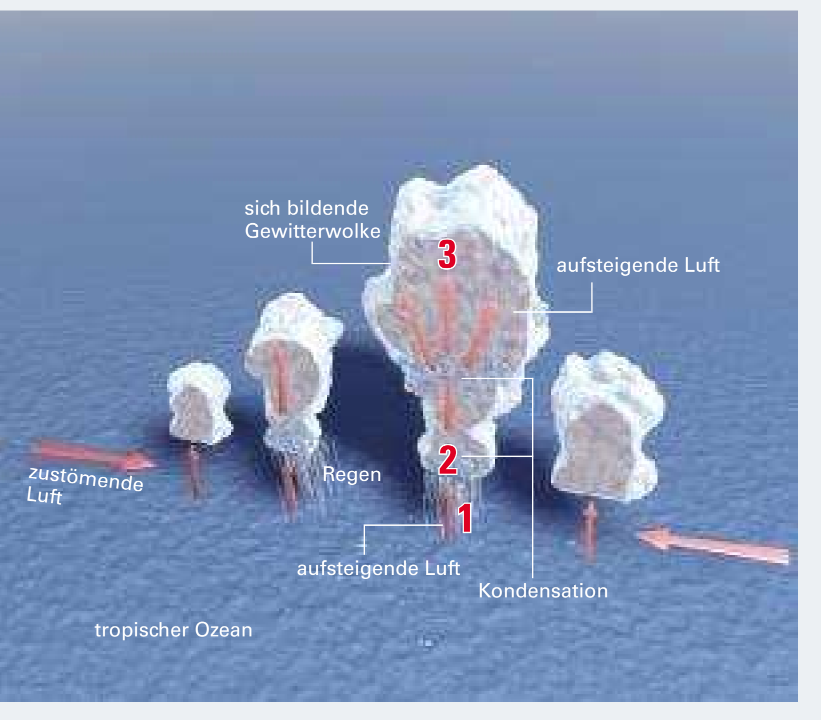
Erste Impfversuche per Flugzeug

Bei der Kondensation wird zugleich Wärme frei. Sie entspricht genau der Energie, die zuvor bei der Verdunstung des Wassers an der Meeresoberfläche aufgenommen wurde. Diese so genannte latente Kondensationswärme verleiht der Luft zusätzlichen Auftrieb und lässt sie in einem sich selbst verstärkenden Rückkopplungsprozess weiter emporsteigen. Die entstehenden Gewitterzellen vereinigen sich schließlich und organisieren sich zu einem riesigen Tiefdruckwirbel mit dem berüchtigten Auge: der stillen, klaren Nabe im Rad der rotierenden Wolkenmassen.

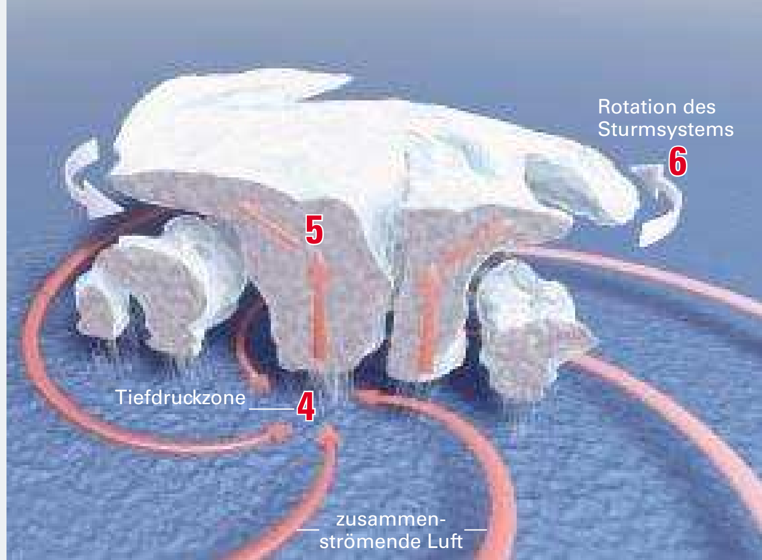
Da Hurrikane ihre Energie hauptsächlich aus der Wärme beziehen, die bei der Kondensation von Wasserdampf zu Wolken und Regen freigesetzt wird, konzentrierten sich die ersten Versuche zur Zähmung der Wirbel auf das Eingreifen in den Kondensationsprozess. Dazu gab es damals nur ein praktikables Verfahren: ▷

Anatomie eines Hurrikans

Will man im Stande sein, einen Hurrikan abzuschwächen oder abzulenken, muss man zunächst einmal seine Entwicklung präzise und detailliert vorhersagen können. Dies setzt eine genaue Kenntnis der Mechanismen voraus, die einen Wirbelsturm entstehen und wachsen lassen. Hier ist der Vorgang in groben Zügen umrissen.



Hurrikane bilden sich über erhitzten tropischen Meeren, die Wärme und Wasserdampf an die Atmosphäre abgeben, sodass sich große Mengen feuchtwarmer Luft über der Wasseroberfläche sammeln (1). Warme Luft steigt auf, wobei der enthaltene Wasserdampf kondensiert und Wolken bildet, aus denen Niederschlag fällt (2). Bei der Kondensation wird Wärme freigesetzt, was den Luftmassen in den sich auftürmenden Gewitterwolken noch mehr Auftrieb verleiht (3).



Diese Aufwärtsbewegung erzeugt einen Sog, der über der Oberfläche des tropischen Meers eine Tiefdruckzone entstehen lässt, in die von außen weitere feuchtwarme Luft hineinströmt (4). Auch sie wird im Zentrum emporgesaugt und führt dem sich aufbauenden Sturmsystem große Mengen an Wärme und Wasserdampf zu (5). Das Tief verstärkt sich und noch mehr Luft strömt nach innen, wobei sie durch die Erddrehung spiralförmig abgelenkt wird: Das Wolkensystem beginnt sich um die eigene Achse zu drehen (6). Dieser sich selbst verstärkende Prozess schreitet schnell voran. Der Sturm gewinnt an Intensität, während das Wolkensystem durch Selbstorganisation eine komplexe großräumige Struktur annimmt.

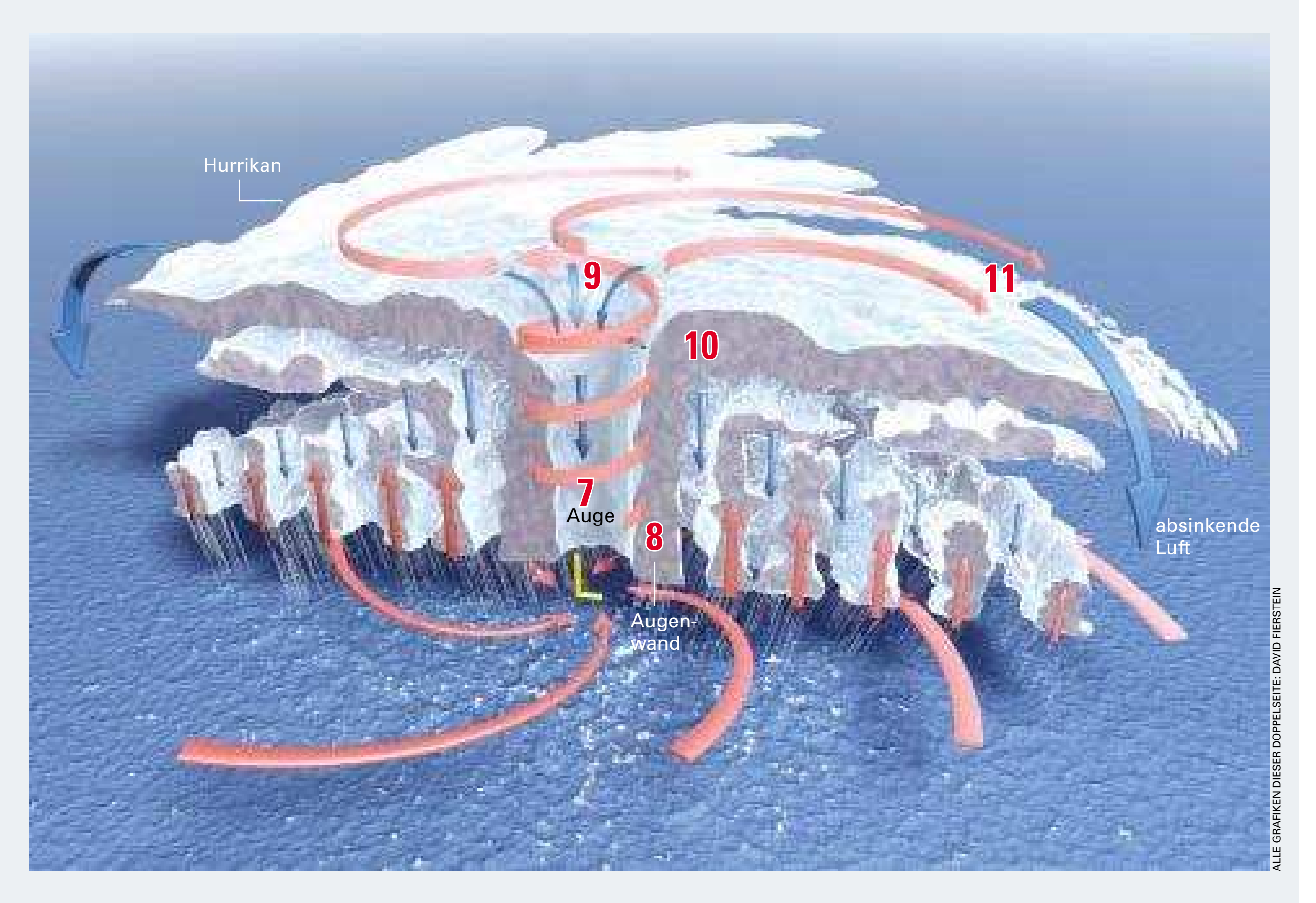
▷ die Wolkenimpfung. Anfang der 1960er Jahre testete ein wissenschaftliches Beratungsgremium der US-Regierung im Rahmen des Projekts »Sturmwut« (»Stormfury«) mit einer Reihe mutiger, wenn nicht tollkühner Experimente die Machbarkeit dieses Ansatzes.

Die Absicht war, den Niederschlag im ersten Regenband außerhalb des Auges zu verstärken und dadurch die Entwicklung des Hurrikans zu bremsen. Als Mittel dazu impften die Forscher die Wolken mit Silberiodidkristallen, die sie aus Flugzeugen abwarfen. Die ausgestreuten Feststoffe sollten als Kondensationskeime in dem unterkühlten Wasserdampf, der in die höchsten, kältesten Regionen des Wirbels aufgestiegen war, Eispartikel entstehen lassen, sodass die Wolken schneller anwachsen und die Vorräte an feuchtwarmer Luft über der Meeresoberfläche aufbrauchen, die andernfalls die anwachsende Augenwand füttern würden. Auf diese Weise nähme, so die Theorie, der Radius des Auges zu und die Stärke des Hurrikans entsprechend ab – wie bei einer Eisläuferin, die bei einer Pirouette die Arme ausbreitet, um langsamer zu werden.

Chaotische Wetterküche

Die Ergebnisse waren im besten Fall gemischt. Heute halten Meteorologen das Impfen von Hurrikanwolken mit Kondenskeimen für wenig wirksam, weil die Luft im Wirbel entgegen früheren Annahmen kaum unterkühlten Wasserdampf enthält.

Unsere aktuellen Untersuchungen sind aus einer Idee heraus geboren, die ich vor dreißig Jahren als graduierter Student bei der Beschäftigung mit der Chaostheorie hatte. Als chaotisch bezeichnet man ein System, das vom Zufall bestimmt scheint, tatsächlich aber präzisen Regeln gehorcht. Das entscheidende Merkmal ist eine hohe Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen, wodurch minimale, scheinbar unbedeutende Störungen in der Regel tief greifende Auswirkungen haben, die in kurzer Zeit unvorhersehbare Folgen nach sich ziehen. Im Fall der Hurrikane etwa können winzige Variationen bei Fakto-



Dabei entwickelt sich in der Regel ein Auge: ein windstilles, klares Gebiet im Zentrum des Tiefdrucksystems (7). Es ist umgeben von einem Ring aus Wolken, der so genannten Augenwand (8). Damit hat sich der Sturm zum Hurrikan entwickelt. Schließlich stößt die erhitzte Luft, nachdem sie fast all ihre Feuchtigkeit verloren hat, an die Stratosphäre, die wie ein Deckel wirkt. Deshalb kann sie nicht noch weiter aufsteigen. Ein Teil von ihr wird zurück in das Auge (9) und zwischen die Wolkenbänder (10) gedrückt. Der Rest bewegt sich spiralförmig nach außen und sinkt am Rand des Hurrikans ab (11). Das gesamte Sturmsystem wandert weit gehend passiv mit großräumigen Luftströmungen wie dem Strahlstrom mit.

ren wie der Meerestemperatur, der Lage großräumiger atmosphärischer Strömungssysteme wie des Strahlstroms oder sogar der Form der um das Auge rotierenden Regenwolken die Zugbahn und Intensität des Sturms stark beeinflussen.

Für Meteorologen ist die enorme Empfindlichkeit der Atmosphäre gegenüber winzigen Einflüssen, durch die sich kleine Fehler in den Wettervorhersagemodellen rasch potenzieren, ein Ärgernis, das langfristige Vorhersagen so schwierig macht. Ich dagegen fragte mich, ob geringfügige, künstlich verursachte Störungen in einem Hurrikan ähnlich gravierende Folgen hätten und ob es auf diese Art gelingen könnte, den Sturm zu beeinflussen – ihn also zum Beispiel von dicht ▷

IN KÜRZE

- Das Team des Autors hat mit **hoch entwickelten Wettervorhersagemodellen** frühere Hurrikane simuliert. Dabei konnte es die komplexen internen Prozesse reproduzieren, die für die Entstehung und Entwicklung schwerer tropischer Stürme verantwortlich sind.
- Die Simulation bestätigte, dass **Hurrikane chaotische Systeme** sind, die empfindlich auf geringfügige Veränderungen physikalischer Bedingungen wie der Lufttemperatur und -feuchtigkeit im Sturmzentrum sowie in den umliegenden Regionen reagieren.
- Mit raffinierten numerischen Optimierungsverfahren konnten die Forscher ermitteln, welche der aktuellen Parameter eines Hurrikans man ändern müsste, um die **Winde abzuschwächen** oder den Sturm von bewohnten Gebieten wegzudirigieren.
- Sollten sich diese theoretischen Ergebnisse in die Praxis umsetzen lassen, böten sie erstmals die Möglichkeit, zum Schutz von Leben und Eigentum **in den Verlauf eines Hurrikans** einzugreifen.

▷ bevölkerten Regionen wegzulenken oder die Windgeschwindigkeit zu drosseln.

Damals war ich nicht in der Lage, diese Ideen weiterzuverfolgen, aber im vergangenen Jahrzehnt sind die Methoden der Computersimulation und Fernerkundung so weit vorangeschritten, dass mein Interesse an einer großräumigen Beeinflussung des Wetters wieder auflebte. Mit finanzieller Unterstützung durch das Nasa-Institut für fortschrittliche Konzepte modellieren meine Mitarbeiter und ich bei der Firma Atmospheric and Environmental Research (AER) – einem Dienstleister im Bereich Forschung und Entwicklung – Hurrikane im Rechner und suchen nach Erfolg versprechenden Steuerungsmöglichkeiten, die dann in realen Versuchen ausprobiert werden könnten. Im Besonderen simulieren wir das Verhalten früherer Wirbelstürme und testen die Auswirkungen verschiedener Eingriffe, indem wir schauen, welche Änderungen sie bei den modellierten Stürmen hervorrufen.

Manipulation im Modell

Die besten heutigen Computermodelle zur Wettervorhersage taugen mit einiger Anstrengung auch dazu, Hurrikane nachzubilden. Sie simulieren die Entwicklung des Wetters – oder eben auch eines Wirbelsturms –, indem sie den wechselnden Zustand der Atmosphäre in kurzen, aufeinander folgenden Zeitschritten berechnen. Dabei lautet eine Grundannahme, dass innerhalb der Lufthülle keinerlei Masse, Energie, Impuls und Feuchtigkeit entsteht oder vernichtet wird. Ein wanderndes System wie ein Hurrikan führt diese Größen, deren Gesamtbetrag jeweils unveränderlich bleibt, in der Strömung mit sich. An seinen Rändern oder Grenzen aber verhält es sich anders. An der Meeresoberfläche zum Beispiel können sich die Gesamtbeträge für die vier Größen innerhalb der Atmosphäre erhöhen oder erniedrigen.

Für Meteorologen ist der Zustand der Atmosphäre durch einen vollständigen Satz physikalischer Variablen wie Druck, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung bestimmt. Sie entsprechen den Größen, die bei der Computersimulation erhalten bleiben. In den meisten Wettermodellen sind diese beobachtbaren Messwerte auf einem dreidimensionalen Gitter definiert, das die Atmosphäre verkörpert. So lässt sich der Verlauf jeder Eigenschaft in einem Höhenniveau als Karte darstellen. Die Gesamtheit der Werte aller Variablen auf dem Gitter heißt Modellzustand.

Um eine Vorhersage zu erstellen, erzeugt das Computerprogramm aus einem solchen Modellzustand denjenigen, der wenig später eintritt, und dann den jeweils nächsten, wobei es diese Prozedur zigfach wiederholt. Die Zeitabstände liegen dabei zwischen einigen Sekunden bis Minuten – je nach der Auflösung oder Genauigkeit, mit der die Wetterentwicklung simuliert werden soll. Letztlich berechnet der Computer für jeden Zeitschritt die Auswirkungen der Winde, welche die verschiedenen Erhaltungsgrößen mitführen, sowie von Prozessen wie solarer Aufheizung, Verdunstung, Niederschlag, Oberflächenreibung und Wärmeabstrahlung, die in dem interessierenden Gebiet auftreten.

Meteorologische Vorhersagen sind zwangsläufig unvollkommen. Das liegt unter anderem daran, dass bereits der Modellzustand zu Beginn immer unvollständig und ungenau ist. Bei einem Hurrikan lassen sich die Anfangsbedingungen besonders schwer ermitteln, weil direkte Beobachtungsdaten spärlich und nur mühsam zu bekommen sind. Das ist umso fataler, als gerade Hurrikane, wie wir aus Satellitenbildern der Wolken wissen, ungewöhnlich komplexe, detailreiche Strukturen haben. Leider liefern die Wolkenbilder, auch wenn sie potenziell nützlich sind, nicht annähernd genug Informationen.



Rückwärtskorrektur des Anfangszustands

Aber auch bei perfektem Ausgangszustand des Modells bliebe die Simulation schwerer tropischer Stürme fehlerhaft. Der Grund sind Unzulänglichkeiten der Computermodelle, in denen sich zum Beispiel Vorgänge auf Skalen unterhalb des Abstands benachbarter Gitterpunkte nicht darstellen lassen. Deshalb werden die Strukturen des Hurrikans in der Nähe der Augenwand, seinem bedeutendsten Element, geglättet und die Details verwischt. Zudem verhalten sich die Modelle – ebenso wie die Atmosphäre, die sie simulieren – chaotisch, wodurch sich Fehler der genannten Art im Verlauf der Berechnungen schnell aufschaukeln.

Trotz dieser Probleme bleibt die Computersimulation wertvoll für unsere Zwecke. Um die Beeinflussbarkeit von Hurrikanen zu prüfen, modifizierten wir eine hoch entwickelte Methode zur Festlegung des Ausgangszustands einer Wettervorhersage, das so genannte vierdimensionale variationelle Datenassimilationsverfahren (4dVar). Die im Namen erwähnte vierte Dimension ist die Zeit. Forscher am Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage in Shinfield Park (England), einem der weltweit führenden Zentren für Meteorologie, verwenden dieses Verfahren für die tägliche Wettervorhersage.

Um das Beste aus den Messwerten zu machen, die Satelliten, Schiffe, Wetterstationen und Ballons vor Beginn der Vorhersage geliefert haben, verknüpfen die Meteorologen diese Beobachtungsdaten mit einer fundierten ersten Näherung des aktuellen Zustands der Atmosphäre. Dieser Vorgang heißt Datenassimilation. Als erste Näherung dient gewöhnlich die sechs Stunden zuvor erstellte Vorhersage für den Zeitpunkt der Datennahme. Das Ergebnis der Verknüpfung der echten Daten und der ersten Näherung dient dazu, die nächste Sechs-Stunden-Vorhersage zu starten.

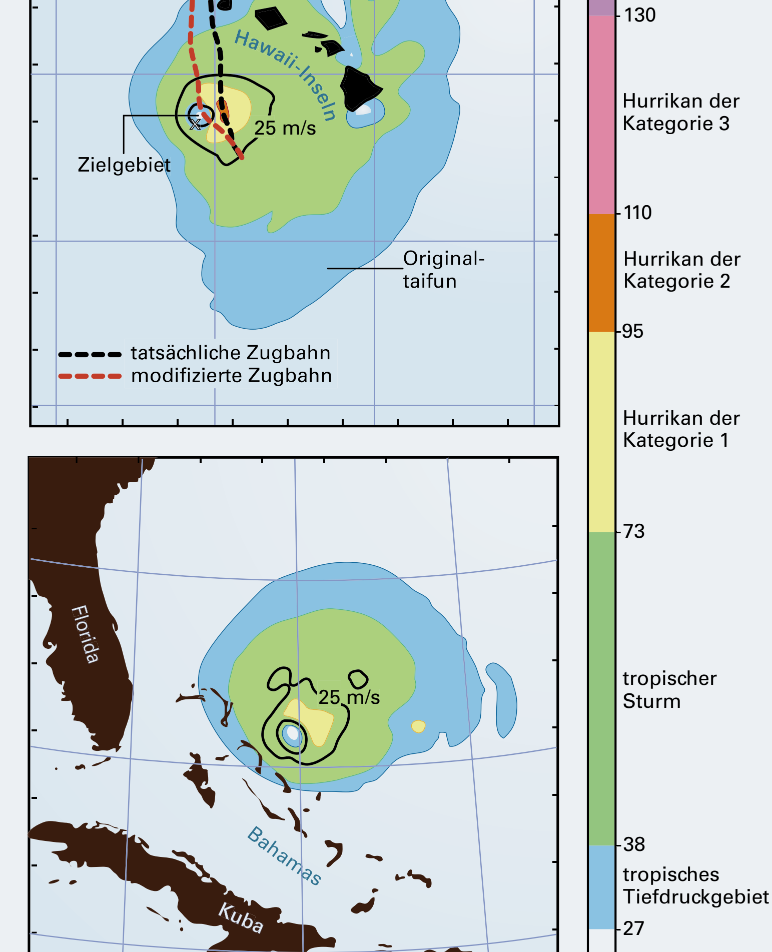
In der Theorie approximiert die Datenassimilation das reale Wetter optimal,

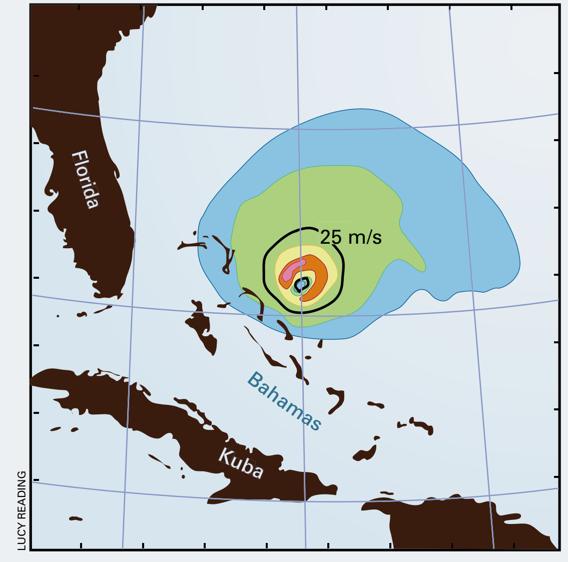
Die Steuerung simulierter Stürme

Anhand von Computermodellen simulierten die Autoren zwei verheerende Wirbelstürme von 1992: Iniki und Andrew. Die Farben repräsentieren Sturmstärken nach dem Klassifikationssystem für Hurrikane. Bei den schwarzen Höhenlinien erreicht die Windgeschwindigkeit 25 Meter pro Sekunde – den kritischen Wert, ab dem Schäden auftreten.

Wenn bei den Simulationen von Iniki (rechts) die Originaldaten verwendet wurden, verlief die Zugbahn (schwarze gepunktete Linie) wie in der Realität dicht an Kauai vorbei. Bei leicht veränderten Anfangsbedingungen, insbesondere einer höheren Temperatur und Feuchtigkeit an verschiedenen Punkten, machte die simulierte Zugbahn des Wirbels (rote gepunktete Linie) einen Schwenk zu einem vorher festgelegten Zielgebiet etwa hundert Kilometer weiter westlich und damit einen Bogen um Kauai.

Die unteren Karten zeigen Simulationen von Hurrikan Andrew im Original (links) und in einer künstlich abgewandelten Form (rechts). Zwar gibt es auch im manipulierten Sturm einen großen Bereich mit Winden oberhalb der Grenze, ab der Schäden auftreten. Aber die Höchstgeschwindigkeiten haben sich stark verringert, sodass sich der Hurrikan der Kategorie 3 in einen viel harmloseren der Kategorie 1 verwandelte.





da sie den Modellzustand sowohl an die direkten Beobachtungen als auch an die Sechs-Stunden-Vorhersage anpasst und somit beide austariert. Obwohl die statistische Grundlage der Methode eindeutig ist, erfordert ihre konkrete Umsetzung allerdings zusätzliche Annahmen und Informationen, die sich nur schätzen lassen. In der Praxis der Datenassimilation steckt deshalb ein gerüttelt Maß an Erfahrung und Fingerspitzengefühl.

Das 4dVar-Verfahren ermittelt einen Atmosphärenzustand, der den Modellgleichungen genügt und zugleich der ersten Näherung wie auch den Beobachtungsdaten sehr nahe kommt. Es löst diese schwierige Aufgabe, indem es den Modellzustand, welcher der vor sechs Stunden gemachten Vorhersage zu Grunde lag, nachträglich anhand der Abweichungen zwischen dieser Vorhersage und den neuen Beobachtungsdaten korrigiert. Dazu berechnet es aus den Abweichungen die Empfindlichkeit des Modells, das heißt den Grad, in dem sich kleine Änderungen bei jedem einzelnen Parameter auf die Güte der Anpassung an die realen Messwerte auswirken.

Diese Berechnung, die ein so genanntes adjungiertes Modell benutzt, durchläuft das sechsstündige Vorhersageintervall rückwärts in der Zeit. Ein Optimierungsprogramm ermittelt schließlich die Korrekturen an dem ursprünglichen Modellzustand, die dafür sorgen, dass ein neuerlicher Simulationslauf die tatsächliche Entwicklung des Wetters – oder eines Wirbelsturms – während der sechs Stunden möglichst genau nachbildet. ▷

▷ Weil die nachträgliche Korrektur anhand approximierter Modellgleichungen erfolgt, muss der gesamte Vorgang – die Simulation, die Ermittlung der Abweichungen, das Aufstellen des adjungierten Modells und die Optimierung – zur Feinabstimmung der Ergebnisse viele Male wiederholt werden. Das Endresultat all dieser Durchgänge dient dann als erste Näherung für die nächste Sechs-Stunden-Vorhersage.

Mit diesem Verfahren lassen sich auch nachträglich frühere Hurrikane simulieren. Anschließend kann man einen oder mehrere Parameter zu verschiedenen Zeitpunkten variieren und nachschauen, wie sich diese Störungen auswirken. Dabei zeigt sich, dass sich der anfängliche Effekt meist nach kurzer Zeit verflüchtigt. Nur Eingriffe mit speziellen Eigenheiten – einem Muster oder einer besonderen Struktur, die zu einer Selbstverstärkung führt – wachsen sich so weit aus, dass sie den Verlauf des Sturms merklich beeinflussen.

Zur Veranschaulichung kann man sich zwei Stimmgabeln vorstellen, von denen die eine angeschlagen wird. Ist die andere nicht auf den gleichen Ton gestimmt, schwingt sie nicht mit, obwohl die akustischen Wellen, die von der ersten Gabel ausgehen, an ihr rütteln. Nur wenn sie dieselbe Eigenfrequenz hat, gerät sie in Resonanz und beginnt auch zu vibrieren. Analog gilt es bei einem Hurrikan genau den richtigen Stimulus – Änderungen der Parameter – zu finden, damit eine dauerhafte Reaktion in der gewünschten Richtung auftritt.

Den Sturm besänftigen

Unsere Forschungsgruppe bei AER hat Simulationsversuche zu zwei schweren Wirbelstürmen von 1992 durchgeführt. Als damals im September der Taifun Iniki direkt über die Hawaii-Insel Kauai hinwegzog, forderte er etliche Menschenleben und verursachte erhebliche Sachschäden. So walzte er ganze Wälder platt. Auch Hurrikan Andrew, der einen Monat vorher knapp südlich von Miami über Florida hereingebrochen war, hinterließ eine Spur der Verwüstung.

Trotz all der Unzulänglichkeiten auch modernster Vorhersagemethoden war unser erster Simulationsversuch überraschenderweise gleich ein Erfolg. Wir versuchten, den Modellzustand von Iniki dreißig Stunden vor dem Landfall auf Kauai so zu verändern, dass sich der Taifun sechs Stunden später hundert Kilometer westlich seiner tatsächlichen Zugbahn befände. Entsprechend erzeugten wir künstliche Messdaten, die zu diesem angestrebten Zielort passten, und fütterten damit das 4dVar-System. Dann ließen wir den Computer die kleinste Änderung am ursprünglichen Datensatz berechnen, welche die veränderte Zugbahn liefern würde. Dabei ließen wir zunächst einmal jede künstliche Veränderung des Sturmsystems zu – unabhängig davon, ob sie auch real machbar wäre.

Wie sich zeigte, betrafen die wichtigsten Veränderungen die Anfangstemperaturen und -winde. An den meisten Punkten im Gitternetz waren die Anpassungen minimal und lagen im Bereich von zehntel Graden. Die größte Modifikation ergab sich für die unterste Modellschicht westlich des Sturmzentrums, wo die Temperatur beim manipulierten Hurrikan um fast zwei Grad Celsius höher lag. Auch die Windgeschwindigkeiten änderten sich im Allgemeinen nur wenig: um drei bis fünf Kilometer pro Stunde. Wiederum aber gab es Ausnahmen an einigen wenigen Stellen. So divergierten in der Nähe des Sturmzentrums wegen geringfügiger Änderungen der Windrichtung die Geschwindigkeiten um bis zu dreißig Kilometer pro Stunde.

Obwohl beide Computerversionen von Iniki, die ursprüngliche und die abgewandelte, fast die gleiche Struktur zeigten, reichten die Unterschiede bei den Schlüsselvariablen aus, den manipulierten Taifun in den nächsten sechs Stunden nach Westen abdriften zu lassen, bevor er in Richtung Norden weiterzog. Kauai blieb dadurch vor dem Schlimmsten bewahrt. Die relativ kleinen künstlichen Eingriffe in die Anfangsbedingungen pflanzten sich durch den komplexen Satz nichtlinearer Gleichungen hindurch fort und ließen den simulierten Sturm nach sechs Stunden an dem gewünschten Ort ankommen.

Dieser erste Versuch bestärkte uns in dem Gefühl, auf dem richtigen Weg zu sein. Herauszufinden, an welchen Schrauben man drehen musste, um schließlich auch echte Hurrikane zu beeinflussen, schien kein Ding der Unmöglichkeit. Bei den nächsten Simulationen verwendeten wir dann engmaschigere Gitter und stellten das 4dVar-System auf das Ziel ein, die Sachschäden zu minimieren.

Bei einem Versuch mit dem so abgewandelten Programm berechneten wir die Temperaturänderungen, die nötig gewesen wären, um die Stärke der Bodenwinde von Hurrikan Andrew beim Landfall in Florida zu begrenzen. Unser Ziel lautete, mit der kleinstmöglichen Abwandlung des anfänglichen Temperaturmusters (um die Eingriffe bei einem echten Sturm so einfach wie möglich zu halten) die schlimmsten Sturmböen während der letzten beiden Stunden des Sechs-Stunden-Intervalls zu drosseln. In diesem Fall ergab das 4dVar-Verfahren, dass zur Begrenzung der Sturmschäden vor allem die Anfangstemperaturen in der Nähe des Sturmauges zu erhöhen wären – an einigen Stellen um immerhin zwei bis drei Grad Celsius. Im weiteren Umkreis – bis in Entfernungen von 800 bis 1000 Kilometern – wären nur noch kleinere Temperaturänderungen (um weniger als ein halbes Grad) nötig. Diese Störungen bilden ein wellenartiges Muster aus abwechselnd wärmeren und kälteren Ringen um das Zentrum des Hurrikans.

Von der Theorie zur Praxis

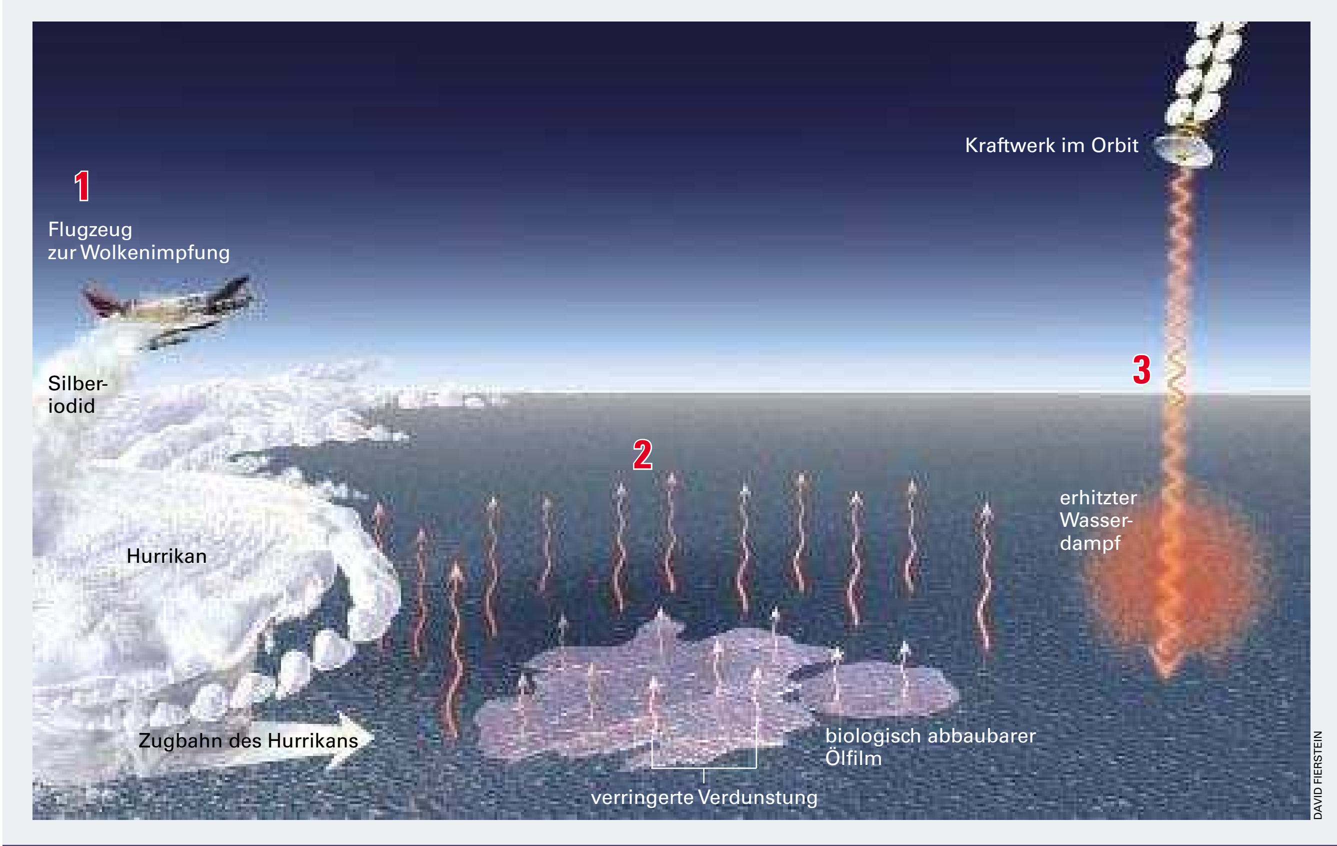
Obwohl die künstlichen Eingriffe nur die Temperatur betrafen, schlugen sie nach kurzer Zeit auf alle Schlüsselvariablen durch. Bei der Simulation des Originalhurrikans stiegen die Windgeschwindigkeiten am Ende des Sechs-Stunden-Intervalls im gesamten Süden Floridas auf über achtzig Kilometer pro Stunde; in dem veränderten Modelllauf wurde diese kritische Grenze für Schäden an Gebäuden und Einrichtungen dagegen nirgendwo erreicht.

Als Test auf die Verlässlichkeit dieser Ergebnisse brachten wir dieselbe Störung in einem noch feinmaschigeren Gitter mit entsprechend höherer Auflösung an. Das Resultat war sehr ähnlich. Demnach hing der Ausgang unserer Experimente nicht von einem bestimmten Modell oder seiner Konfiguration ab. Allerdings tauchten auch in der veränderten Simulation nach weiteren sechs Stunden wieder Winde mit Geschwindigkeiten oberhalb der Schadensgrenze auf, sodass es weiterer Interventionen bedurft hätte, Südflorida zu schützen. Tatsächlich scheint eine Serie gezielter Eingriffe erforderlich zu sein, will man einen Hurrikan über längere Zeit unter Kontrolle halten.

Wenn sich also ein Hurrikan, wie unsere Ergebnisse andeuten, durch kleine

Möglichkeiten zum Eingriff

Wie Computersimulationen von Wirbelstürmen ergaben, könnten Änderungen von Niederschlag, Verdunstung und Lufttemperatur die Zugbahn beeinflussen oder die Winde drosseln. Dabei gibt es mehrere Eingriffsmöglichkeiten. Ein gezieltes Beimpfen der Wolken aus der Luft mit Silberiodid oder anderen Stoffen, die den Niederschlag fördern, könnte der Augenwand die zum Wachsen und Sichverstärken benötigte Feuchtigkeit entziehen (1). Denkbar wäre auch, das Meer entlang der Zugbahn eines Hurrikans mit einem biologisch abbaubaren Öl zu überziehen, um die Verdunstung zu hemmen, die dem Sturm als Energiequelle dient (2). Künftige erdumlaufende Solarkraftwerke, die mit großen Spiegeln Sonnenlicht auf fotovoltaische Zellen bündeln und die aufgefangene Energie mit Mikrowellen zu Empfängern am Erdboden übertragen sollen, könnten bei leicht geänderter Sendefrequenz mit Wasserdampf im Sturmsystem oder in dessen Umgebung wechselwirken (3). Dieser würde dabei aufgeheizt, sodass sich die umgebende Luft erwärmt. Den Simulationen zufolge sollte es mit einem solchen gezielten Wärmepuls gelingen, den Hurrikan abzuschwächen oder in eine gewünschte Richtung zu lenken.



Änderungen der Temperatur auf vorhersagbare Weise ablenken oder abschwächen lässt, stellt sich als Nächstes die Frage: Wie kann man solche Störungen erreichen? Natürlich ist das nicht einfach.

Die benötigte Energiemenge wäre gewaltig, aber eine ohnehin geplante Serie von Solarkraftwerken im Weltall könnte sie eines Tages liefern. Diese Strom erzeugenden Satelliten würden mit riesigen Spiegeln das Sonnenlicht auf Solarzellen fokussieren, welche die aufgefangene Energie zu Mikrowellenempfängern am Boden senden. Damit keine Energie verloren geht, soll die zur Erde geschickte Strahlung zwar eine Frequenz haben, bei der sie die Atmosphäre ungehindert passiert und die Luft nicht durch Absorption erwärmt. Für die Beeinflussung des Wetters könnte man jedoch auf Frequenzen überwechseln, bei denen die Mikrowellen von Wasserdampf teilweise oder ganz verschluckt werden. So ließen sich gezielt Bereiche der Atmosphäre in einer gewünschten Höhe aufheizen.

Dabei blieben allerdings, da Mikrowellen Regentropfen praktisch nicht durchdringen, große Gebiete im Inneren des Hurrikans und darunter unzugänglich. Ausgerechnet dort, wo 4dVar in den geschilderten Experimenten die größten Temperaturänderungen ergab, würde die Fernheizung aus dem All somit nicht funktionieren. Deshalb machten wir eine weitere Simulation, bei der wir die Temperatur im Zentrum des Hurrikans konstant hielten, während der Computer den optimalen Satz an Störungen suchte. Auch unter dieser Einschränkung gelang es, den Hurrikan in der gewünschten Weise zu beeinflussen: Zum Ausgleich für die gleich bleibende Anfangstemperatur im Sturmzentrum mussten eben nur die Temperaturänderungen außerhalb größer ausfallen. Wie sich zeigte, erwärmte sich während der Simulation dann das Auge des Hurrikans binnen Kurzem von selbst.

Eine andere potenzielle Methode zur Beeinflussung schwerer tropischer Stürme wäre die direkte Einschränkung der Energiezufuhr durch Überziehen der Meeresoberfläche mit einem dünnen Film aus biologisch abbaubarem Öl, das ▷

▷ die Verdunstung verlangsamt. Denkbar wäre auch, schon Tage vor dem Herannahen eines Hurrikans und Tausende von Kilometern von der Küste entfernt schrittweise Eingriffe vorzunehmen. Indem diese sich auf den Luftdruck auswirken, könnten sie Veränderungen in den großräumigen Windmustern im Bereich des Strahlstroms hervorrufen, was einen bedeutenden Einfluss auf Intensität und Zugbahn des Wirbelsturms hätte. Vielleicht ließen sich die geeigneten Veränderungen am Anfangszustand sogar durch relativ kleine Modifikationen bei normalen menschlichen Aktivitäten herbeiführen. So könnte man Flugzeiten und -routen so anpassen, dass die Flugzeuge gezielt an bestimmten Stellen zu einer bestimmten Zeit Kondensstreifen erzeugen und so die Wolkenbildung fördern, oder die Feldbewässerung dazu einsetzen, die Verdunstungsrate regional gezielt zu steigern oder zu drosseln.

Sollte es irgendwann in der Zukunft tatsächlich gelingen, das Wetter zu steuern, ergeben sich allerdings schwierige politische Probleme. Was wäre, wenn ein manipulierter Hurrikan zwar ein Land verschont, sich dafür aber über einem anderen austobt? Und obwohl ein UN-Beschluss den Eingriff in das Wetter als Waffe seit den späten 1970er Jahren verbietet, könnten manche Nationen in Versuchung geraten, wenn die vorerst rein theoretische Möglichkeit in den Bereich des Machbaren rückt.

Doch bis dahin ist es noch weit. Ohnehin sollte man unsere Methoden nicht gleich auf Hurrikane anwenden, sondern erst im kleinen Maßstab testen. So könnte man zunächst versuchen, in einem eng begrenzten Gebiet, wo sich leicht per Flugzeug oder vom Boden aus Störungen einbringen ließen, die Niederschläge zu verstärken. Mit einer dichten Anordnung von Sensoren ließe sich dann die Gültigkeit unserer Konzepte prüfen. Wenn das Verständnis der Wolkenphysik, die digitale Wolkensimulation und die Verfahren zur Datenassimilation so schnelle Fortschritte machen, wie wir hoffen, könnte man vielleicht in zehn bis zwanzig Jahren mit diesen bescheidenen Experimenten beginnen. Sollten sie erfolgreich verlaufen, müssten die Politiker die Situation neu überdenken. Vielleicht erschiene die großräumige Steuerung des Wettergeschehens durch Eingriffe aus dem All dann weniger als Bedrohung denn als sinnvolles Ziel, auf das sich die Menschheit einigen könnte.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Ross N. Hoffman ist Vizepräsident für Forschung und Entwicklung bei der US-Firma Atmospheric and Environmental Research (AER) in Lexington (Massachusetts). Davor war er beim Nationalen Forschungsrat der USA Mitglied im Komitee für den Stand und die zukünftigen Richtungen von Forschung und Maßnahmen zur Wettermodifikation.

Critical issues in weather modification research. Von Michael Garstang et al. National Academy Press, Washington 2003

Controlling the global weather. Von Ross N. Hoffman in: Bulletin of the American Meteorological Society, Bd. 83, S. 241, Februar 2002

The rise and fall of weather modification: changes in american attitudes toward technology, nature, and society. Von Chunglin Kwain in: Changing the Atmosphere. Von Clark Miller und Paul Edwards (Hg.). MIT Press, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Tornados in Deutschland

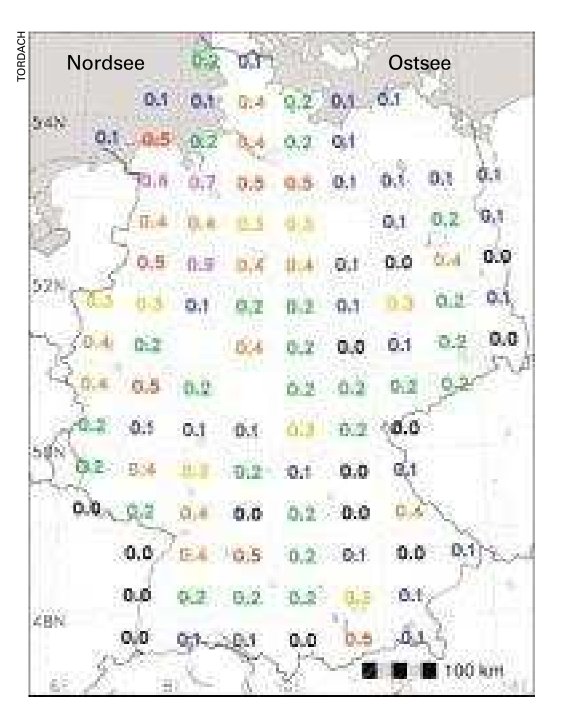


Diesen Artikel finden Sie als Audiodatei unter: www.spektrum.de/audio

Immer häufiger werden die verheerenden Windhosen auch hier zu Lande entdeckt.

Von Sven Titz

Gottlob Burchard Genzmer berichtete im Jahr 1764 dem Minister im Herzogtum Mecklenburg wahrhaft Spektakuläres: Eine Windhose war über mehrere Gemeinden nahe der Stadt Neubrandenburg gefegt und hatte unerhörte Schäden angerichtet. Genzmer fand nicht bloß zerstörte Scheunen und Forste vor. Die Gewalt der Windhose zeigte sich besonders an Baumstümpfen, die »mit ihren Wurzeln aus der Erde gerissen« worden waren. Man hatte dort vor mehreren Jahren Eichen abgeschlagen, zu denen die »Stümmeln« gehörten. Die schweren Baumstümpfe seien durch den Wind »zehen, zwanzig und mehrere Schritte weggewälzet« worden.



◀ **Die Tornadodichte in Deutschland von 1950 bis heute ist in jährlichen Ereignissen pro 10 000 Quadratkilometer angegeben. Am stärksten betroffen war der Westen der norddeutschen Tiefebene.**

Es muss sich um einen Tornado der Maximalstärke 5 auf der Fujita-Skala gehandelt haben, wie man heute anhand der Schilderung rekonstruieren kann. Das bedeutet Windstärken um die 500 Kilometer pro Stunde – schneller als jede andere natürliche Luftströmung auf der Erde und mehr als doppelt so schnell wie der ICE zwischen Hamburg und Berlin.

»Nur zwei Tornados dieser heftigsten Stufe sind für Deutschland bislang dokumentiert«, sagt Nikolai Dotzek, Gründer des Tornado-Netzwerks TorDACH. Schwache Luftwirbel mit Geschwindigkeiten zwischen 70 und 200 Kilometer pro Stunde seien am häufigsten. Über den deutschen Begriff »Windhose« ist der

Meteorologe übrigens nicht besonders glücklich; denn er klingt eher harmlos und suggeriert einen Unterschied zu den amerikanischen Tornados, den es aber nicht gibt. Obendrein wird er oft fälschlich verwendet.

In den vergangenen Jahren haben Tornados in Deutschland mehr und mehr Aufsehen erregt. So sorgte 2004 ein F3-Exemplar – mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 250 Kilometer pro Stunde – in Micheln bei Dessau (Sachsen-Anhalt) für Schlagzeilen. Ein Trend zu mehr Tornados ist in unseren Landen dennoch nicht auszumachen. Nur die Meldungshäufigkeit nimmt zu, weil die Menschen – so Dotzeks Vermutung – aufmerksamer geworden sind.



Am 23. Juni 2004 suchten mehrere Tornados Deutschland heim. Der stärkste wütete in Micheln in Sachsen-Anhalt – hier kurz nach dem Durchzug durch einen Bauernhof, wo er schwere Schäden an den Gebäuden anrichtete.

ALEXANDER HILDEBRANDT, MICHELN

Vorwarnung mit Radar

In den USA gibt es im Jahr 1200 Tornados – Europa liegt mit 300 Fällen deutlich darunter. Durch Deutschland wirbelten in den vergangenen fünf Jahren zwischen 20 und 30 Exemplare jährlich. Todesopfer haben die strudelnden Winde bei uns bisher nur wenige gefordert. In den USA dagegen kosten sie jährlich 25 bis 50 Menschen das Leben. In den 1950er Jahren waren es noch zehnmal so viele. Dank Warnsystem und Infrastruktur (Schutzräume) ist die Zahl der Todesfälle erheblich gesunken.

Damit nicht eines Tages auch in Deutschland einmal viele Opfer zu beklagen sind, entwickelt nun der Deutsche Wetterdienst (DWD) ein Computerwarnsystem. Er kooperiert dabei mit dem Dänischen Meteorologischen Institut, dem Wetterdienst der Schweiz (MeteoSchweiz), dem Meteorological Service Canada und dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr. Das System soll ein paar Minuten im Voraus Alarm schlagen können. Viel eher sind präzise Warnungen vor dem kleinräumigen Phänomen nicht möglich.

Besonders zwischen Mai und August, der Hauptsaison für Tornados hier zu Lande, werden demnächst Meteorologen des DWD auf ihren Computerbildschirmen nicht nur die Aufnahmen der bundesweit 16 Radaranlagen überwachen, sondern auch Spezialbilder, auf denen Gewitter gekennzeichnet sind, welche die gefürchteten Windrüssel hervorbringen könnten. Eine besonders wichtige Rolle spielt dabei das Dopplerradar. Es nutzt den nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler benannten Effekt, um horizontale Windgeschwindigkeiten zu erfassen. Eine Software zur Mustererkennung warnt frühzeitig, sobald Gewitter auftauchen, die von oben wie ein Komma aussehen oder horizontale Luftwirbel mit Durchmessern von wenigen Kilometern aufweisen. Diese so genannte Mesozyklone ist ein deutliches Vorzeichen von Tornados. Auf einer Übersichtskarte sind die gefährlichen Gewitter mit Kreisen markiert, und der Meteorologe kann an die Wolkenstrukturen heranzoomen.

Der Ernstfall wird in Deutschland am häufigsten im Westen der Norddeutschen Tiefebene eintreten. Dort sind, wie TorDACH ermittelt hat, Tornados ungefähr doppelt so häufig wie im Süden. Das liegt besonders an der »vertikalen Windscherung«: Die horizontalen Winde nehmen mit der Höhe zu, während ihre Richtung dreht – das ist eine wichtige meteorologische Voraussetzung für explosive Gewitterstürme. Die entwickeln auch ohne Tornado oft sehr gefährliche Eigenschaften. Lokale Fallböen (Downbursts) gefährden den Flugverkehr, und es kommt zu heftigen Niederschlägen bis hin zu Hagel mit taubeneigroßen Schloßen.

Wird vor einem Tornado gewarnt, so ist man im Innern von Häusern und im Keller am sichersten. Ein Auto mag vor einem Gewitter schützen – einer Windhose ist aber zuzutrauen, dass sie den Wagen umwirft oder Gegenstände aufwirbelt, die seine Fenster zerschmettern. Der Tornadoexperte Charles Doswell (Oklahoma) berichtet aus den USA, dass dort bei besonders heftigen Windhosen inmitten der Trümmer manchmal nur die Badezimmer der Gebäude stehen bleiben – die Rohrleitungen stabilisieren die Wände. Hier zu Lande werden Häuser solider gebaut und Tornados sind relativ selten. Wenn bald das Warnsystem eingerichtet ist, sollte die Gefahr für Leib und Leben, die von ihnen ausgeht, noch geringer werden.

Scharfe Augen im All

Gute Wetterprognosen könnten heute kaum noch ohne meteorologische Satelliten auskommen. Die Daten der modernsten Generation dieser Erdtrabanten versprechen noch präzisere und langfristigere Vorhersagen.

Von Ralf Becker und Oliver Sievers

Alle reden vom Wetter – wir auch! Über kaum ein anderes Phänomen wollen Menschen andauernd so viel wissen. Ob Radio oder Fernsehen: Nachrichtensendungen enden stets mit Schilderungen der aktuellen Wetterlage und dazu der Prognose, wie es in den nächsten Tagen damit weitergeht. Das Interesse ist kein Wunder: Unser Alltag wird von Wetterumständen erheblich beeinflusst – wie wir uns fühlen, wie wir uns kleiden, was wir unternehmen, ob wir zu Hause bleiben, wo wir Urlaub machen. Auch Landwirtschaft und Verkehr sind vom Wetter abhängig. Der aktuelle und künftige Wetterzustand beeinflusst Wirtschaft, Freizeit, Urlaub und Kultur.

Während sich Menschen über die Jahrhunderte eher von regionalen Bauernregeln leiten ließen, benötigt die moderne Wetterprognostik eine möglichst umfassende Kenntnis des aktuellen Zustands der irdischen Lufthülle, am besten global und in allen drei Raumdimensionen. Das erfordert ein weltumspannendes Netzwerk von Sensoren und Wetterstationen sowie eine effiziente Kommunikation. Erst mit der Erfindung des Telegrafen wurde es möglich, Wetterinformationen über den Globus hinreichend schnell auszutauschen.

Viele Jahrzehnte standen den Meteorologen ausschließlich die Messwerte der ungleichmäßig verteilten Wetterstationen zur Verfügung, aus welchen sie die physikalischen Felder interpolieren mussten. Weltweit werden heute wetterrelevante Parameter an gerade mal zehntausend Stationen vermessen.


ESA / CNES-SERVICE OPTIQUE CSG

Mit noch weitaus weniger Stationen wird mittels aufsteigender Radiosonden der vertikale Aufbau der Atmosphäre vermessen. Dieses Messnetz ließ und lässt auch heute noch viel zu wünschen übrig: Es ist weder eng genug geknüpft noch wird häufig genug gemessen, um auch kleinräumige oder kurzlebige Ereignisse zu erfassen. Über den Ozeanen ist es praktisch überhaupt nicht existent. Von dort erreichten Meldungen die Wetterdienste nur sporadisch – von Schiffen und später auch von Flugzeugen. Aber letztendlich konnte über die Atmosphäre nur gemutmaßt werden. Ein echter Überblick über »das Wetter«, wie der Atmosphärenzustand bezeichnet wird, fehlte, insbesondere über den Ozeanen.

Dieser Überblick wurde erstmals 1960 aus mehreren hundert Kilometern Höhe geliefert, und zwar mit den ersten Bildern einer Fernsehkamera auf dem Satelliten Tiros. Es folgten später mehrere Wettersonden der Essa-Serie, deren Daten ab 1966 auch beim Deutschen Wetterdienst empfangen wurden. Im Jahr 1970 startete die amerikanische Raumfahrtbehörde Nasa den ersten Satelliten ihrer Noaa-Serie, 1975 dann den ersten geostationären Trabanten vom Goes-Typ. Parallel dazu platzierte auch die damalige Sowjetunion mehrere Wettersatelliten im All. Ebenfalls mit einem geostationären Satelliten, dem ersten Meteosat, zogen 1977 die Europäer nach. Die drei Trabantenfamilien Noaa,



ESA / DAVID DUCROS

Goes und Meteosat stellen auch heute den wichtigsten Teil des Netzes von Wettersatelliten, über die wir hier berichten.

Damit Satellitendaten in die Wettervorhersagen einfließen können, muss ihre Verfügbarkeit dauerhaft gesichert sein. Dafür muss der Betrieb eines Satellitensystems für eine Reihe von Jahren garantiert werden. Auch sollte wenigstens ein Trabant der jeweiligen Baureihe immer als Back-up im All verfügbar sein, um bei Ausfall des Routinesatelliten sofort einspringen zu können. Daher wird zum Beispiel für den täglichen Vorhersagedienst die Forschungssonde Envisat nicht genutzt, obwohl ihre Messdaten zweifellos meteorologisch hochinteressant sind.

Satelliten, deren Daten in die tägliche Wettervorhersage eingehen, haben eine Reihe von Aufgaben:

▶ Sie sollen dem Meteorologen eine Übersicht über alle Arten von wetterwirksamen Vorkommnissen auf allen Größenskalen liefern: von Hoch- und Tiefdruckgebieten und den damit verbundenen Fronten bis hin zu einzelnen Wolkensystemen im mittelgroßen Bereich, etwa Gewitterwolken. Mit diesen Informationen werden Beobachtungslücken im erdgebundenen Messnetz geschlossen, insbesondere über den Ozeanen.

▶ Daher muss die räumliche Auflösung der Satellitenbilder hinreichend groß sein, um auch kleinräumige Ereignisse erfassen zu können.

▲ Europas erster »Meteosat Second Generation«-Satellit MSG-1, hier dargestellt bei der Trennung von der letzten Raketenstufe, liefert seit 2004 Daten für bessere Wetterprognosen. Links der Erdtrabant in der Montagehalle bei der Firma Alcatel Space Industries

▶ Da zumeist räumliche Ausdehnung und zeitliche Dauer von meteorologischen Ereignissen in enger Beziehung stehen, dürfen die einzelnen Aufnahmen auch zeitlich nicht allzu weit auseinander liegen.

In Zeiten abnehmender Finanzmittel kommt den Wettersatelliten eine weitere ▷

▷ Aufgabe zu. Überall wird das Netz der personalintensiven Wetterwarten sowie der Wetterbeobachter ausgedünnt. Entsprechend reduziert sich die Dichte der Bodenmessungen ebenso wie die der Messungen per Radiosondenaufstieg.

Um die nötigen Aussagen über die Physik der Atmosphäre dennoch bereitstellen zu können, werden künftig vermehrt Wetterdaten von Satelliten genutzt. Um physikalische Eigenschaften zu berechnen, benötigen wir spektrale Messungen, also Beobachtungen bei verschiedenen Wellenlängen. Diese Aussagen werden allerdings nie so exakt sein wie bei unmittelbaren Messungen vor Ort.

Damit wir Satellitenbilder richtig interpretieren können, legen wir die Strahlung zu Grunde, die von allen Körpern mit einer bestimmten Temperatur ausgeht. Sofern diese Körper im thermodynamischen Gleichgewicht sind, strahlen sie ein kontinuierliches Spektrum gemäß der so genannten Planckverteilung aus. Demnach bestimmt die Temperatur des Körpers eine Wellenlänge, bei der die maximale Intensität abgestrahlt wird; beidseitig dieser Wellenlänge fällt die Intensität stark ab. Die Sonne mit einer Oberflächentemperatur von etwa 6000 Kelvin emittiert dabei elektromagnetische Strahlung hauptsächlich bei Wellenlängen von etwa 0,3 bis 4 Mikrometern, dem »solaren« Spektralbereich.

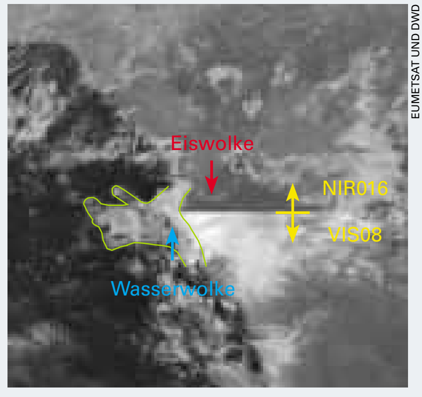
Sensoren für den kleinen Unterschied

Was unterscheidet eine Eiswolke von einer Wasserwolke? Der Schlüssel für die Forscher ist die sogenannte Albedo (von lateinisch *albidus*, weiß), ein Maß für das Reflexionsvermögen einer Oberfläche. Die Sensoren auf Europas neuestem MSG-1-Satelliten lassen die für Meteorologen wichtige Albedoinformation auf einer Aufnahme der afrikanischen Westküste erkennen.

In der Mitte des rechten Bilds ragt eine Gewitterwolke aus einer niedrigen Schichtwolke heraus. Das vereiste Zentrum der Gewitterwolke leuchtet bei sichtbaren Wellenlängen, die der Messkanal »Vis08« einfängt, hell auf (untere Bildhälfte); dagegen bleibt sie im nahen Infrarot des Kanals »Nir016« weit gehend unsichtbar.

An ihrem linken Rand enthält die tiefere Schichtwolke ausschließlich kleine Wassertröpfchen. Diese reflektieren im sichtbaren wie im nahen infraroten Licht etwa gleich kräftig – die Bildhälften zeigen sich fast identisch.

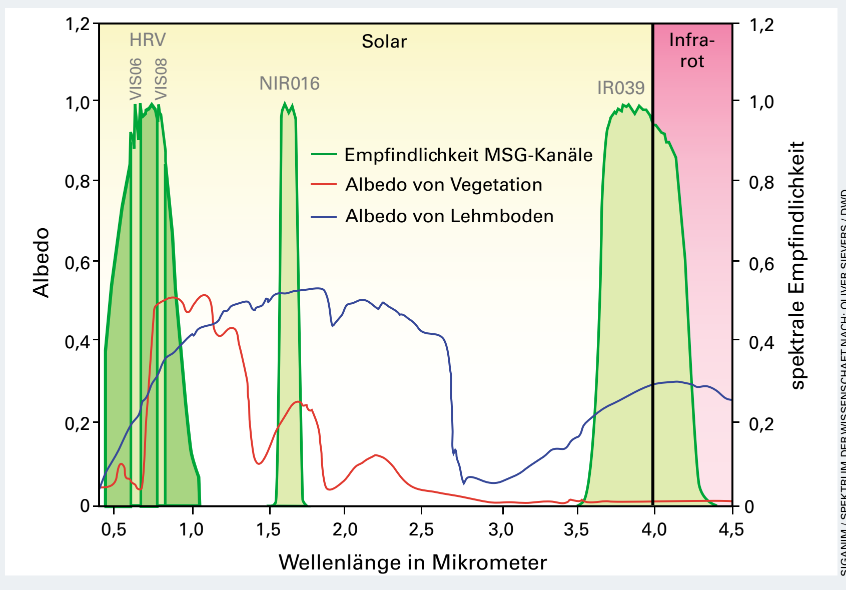
Genauso lässt sich Vegetation von unbegrünten Landmassen unterscheiden. Während Vegetation vor allem sichtbare Wellen reflektiert, mit starken Sprüngen in einzelnen Bereichen, strahlt Lehmboden die einfallende Sonnenstrahlung weitaus »breitbandiger« – sowohl sichtbar als auch infrarot – zurück.



EUMETSAT UND DWD

▲ **Es geschah in Afrika am 19. Mai 2005, 12.00 Uhr Weltzeit: Eine Gewitterwolke mit Eispartikeln überragt eine niedrigere Wasserwolke.**

▼ **Die Sensoren des MSG-Satelliten (grün) registrieren an der Erde reflektierte Sonnenstrahlung, vom Sichtbaren (links) bis zum Infraroten.**



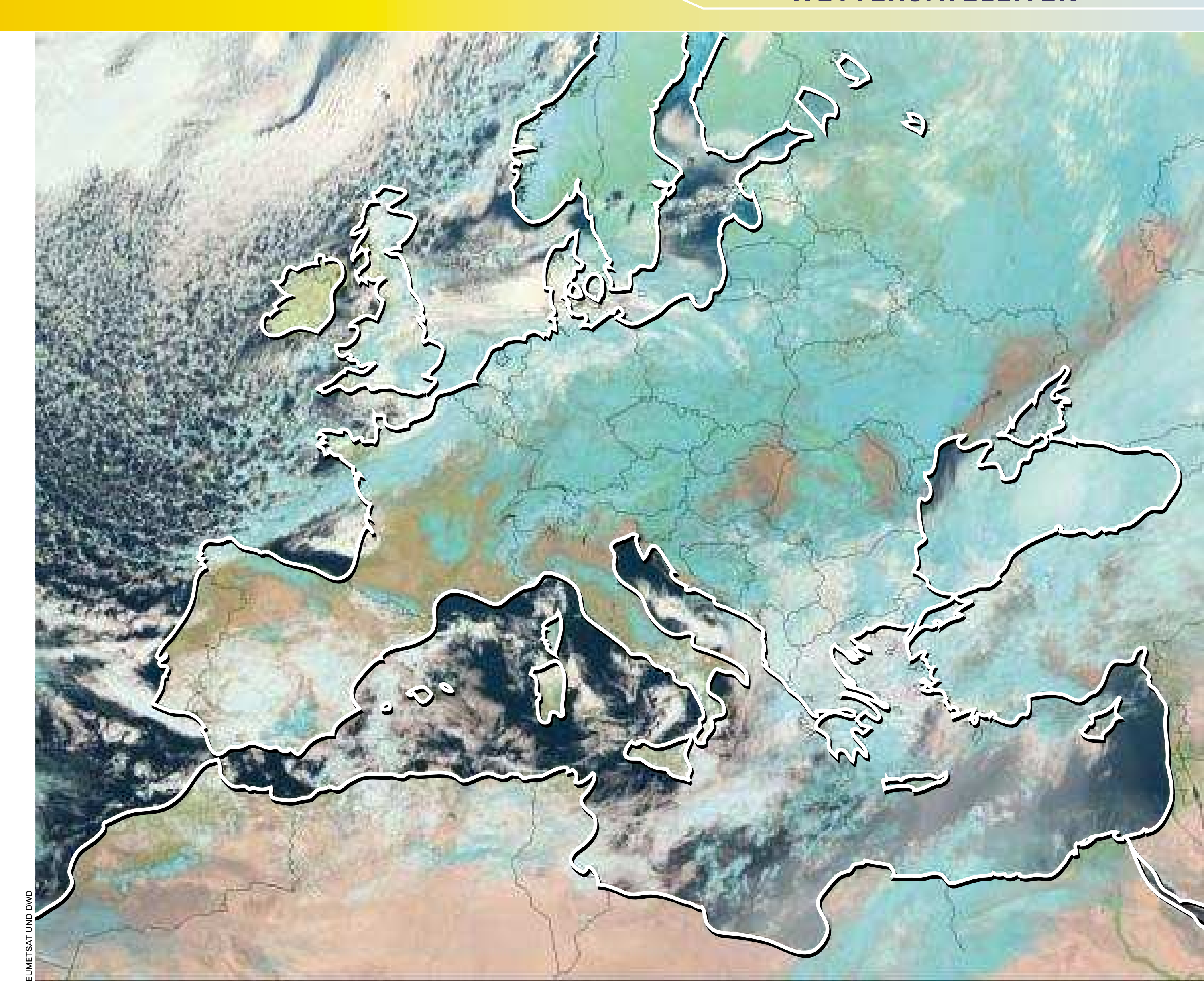
SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH: OLIVER SIEVERS / DWD

Verräterische Eiswolken im Infrarotlicht

Dieser Bereich beinhaltet das für den Menschen sichtbare Licht, das Maximum des Sonnenspektrums liegt bei 550 Nanometern. Daher bekommen Messkanäle der Satelliten in diesem Bereich oftmals auch das Kürzel Vis für *visible*. Das menschliche Auge ist den Eigenschaften des Sonnenlichts optimal angepasst. Es vermag Licht bis zu einer Wellenlänge von etwa 800 Nanometern wahrzunehmen. Dort beginnt das nahe Infrarot, das auch noch zum solaren Spektralbereich zählt. Strahlung zwischen 4 und 100 Mikrometer wird als Infrarotstrahlung bezeichnet. In diesem Bereich strahlt die Erde mit ihrer Durchschnittstemperatur von 15 Grad Celsius. Weiterhin werden in der Satellitenmeteorologie auch noch Mikrowellen im Bereich von wenigen Millimetern genutzt, auf die wir aber hier nicht eingehen werden.

Wettersatelliten detektieren die elektromagnetische Strahlung von Erde und ihrer Atmosphäre. Sofern nur Strahlung natürlichen Ursprungs gemessen wird, spricht man von passiven Instrumenten. Im Gegensatz dazu setzt die Meteorologie auch aktive Instrumente ein, die selbst Radar- oder Laserstrahlen aussenden und das reflektierte Signal messen.

Die meisten Satellitensysteme verwenden Sensoren im solaren und infraroten Spektralbereich. Im solaren Teil bis


EUMETSAT UND DWD

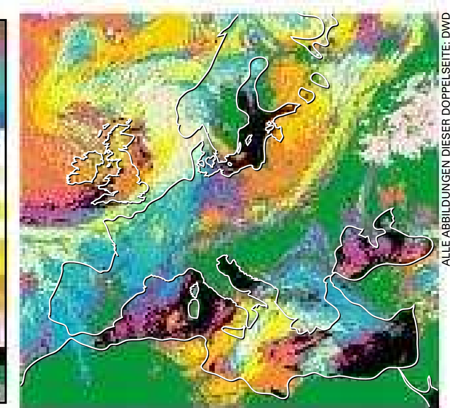
vier Mikrometer ist die Sonne alleiniger Energielieferant. Daher misst jeder solare Messkanal ausschließlich die von Erde und Atmosphäre reflektierte Sonnenstrahlung. Wolken werfen besonders stark zurück, sodass sie in diesen Kanälen sehr hell erscheinen. Eine Ausnahme bilden Eiswolken, die im nahen Infrarot stark absorbieren und daher in den entsprechenden Datenkanälen dunkler wirken (siehe Kasten links). Durch einen Vergleich zwischen zwei Kanälen im Sichtbaren und im nahen Infrarot lassen sich also bereits Aussagen zur Wolkenphysik machen, was uns erste Hinweise auf den Wolkentyp liefert.

Das Reflexionsvermögen, die so genannte Reflektivität, am Erdboden hängt stark vom Untergrund ab, verschiedene Bodentypen verraten sich hier durch charakteristische spektrale Verläufe. Der Vergleich mehrerer Vis-Kanäle kann also dazu dienen, den Untergrund zu identifizieren. Während sich Ackerboden oder Wasseroberflächen in verschiedenen Messkanälen nur wenig voneinander unterscheiden, reflektiert Vegetation in den einzelnen Messkanälen ganz unterschiedlich. Diese Unterschide lassen sich mit der neuesten Generation europäischer geostationärer Wettersatelliten, den MSGs, aus dem Orbit erkunden. Der erste Satellit dieser Reihe leistet derzeit als Meteosat 8 gute Dienste.

Im Gegensatz zum solaren Spektralbereich stammt die beim Satelliten ankommende Strahlung bei Wellenlängen jenseits der vier Millimeter nicht von der Sonne, sondern ausschließlich vom System Erde-Atmosphäre selbst. Nach den Gesetzen der Quantenphysik steigt die emittierte Strahlung mit Temperatur und ihrem Ausstrahlungsvermögen. Je stärker ein Gas Strahlung einer bestimmten Wellenlänge absorbieren kann, desto mehr emittiert es auch wieder. Wolken strahlen grundsätzlich stark ab, bei bestimmten Wellenlängen aber auch Ozon und Kohlendioxid, ja selbst der in der Atmosphäre vorhandene Wasserdampf.

Diese Strahlung von Luft und Boden liefert uns – in Abhängigkeit von der ▷

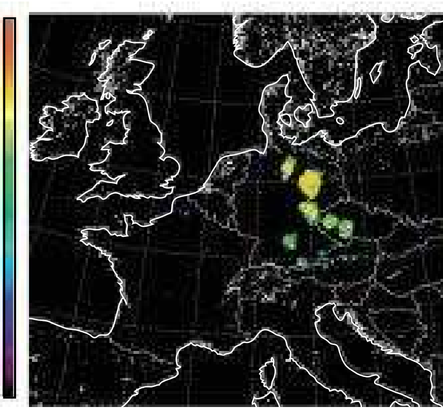
▲ Am 2. März 2005 überdeckten hauptsächlich Schnee und Eiswolken das europäische Festland. Die Wassertröpfchen in den Wolken sind rosa und Eiskristalle, ob in Wolken oder als Schneedecke am Boden, türkis dargestellt. Landoberflächen erscheinen je nach Vegetation braun bis grün.



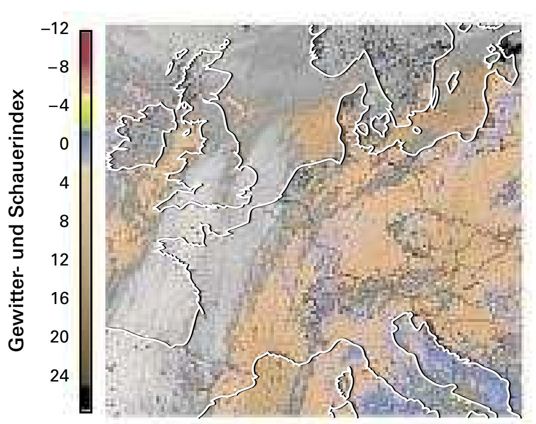
Welche Wolkentypen bedecken Europa?

Temperatur in Grad Celsius
18 7 −4 −15 −26 −37 −48 −59 −70 −81 −93

Wie warm ist die Wolkenobergrenze?



Wo wird es demnächst regnen?



Wo wird es bald gewittern?

ALLE ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: DWD

▷ vertikalen Gasverteilung – Informationen aus unterschiedlichen Höhen. Im Zusammenspiel der verschiedenen Infrarotsensoren beispielsweise auf dem Meteosat 8 können wir so eine Reihe wichtiger Atmosphärenzustände erfassen, etwa die Temperaturen der Wolkenobergrenze oder, im wolkenfreien Fall, der Erdoberfläche sowie weiterer Höhenschichten. Da die Satellitensicht von oben auf die Wolken nicht durch Absorption oberhalb der Wolken gestört wird, können wir aus der Verlagerung von Wolkenstrukturen auch die Windfelder berechnen.

Für meteorologische Routineanwendungen werden die Daten von so genannten Radiometern verwendet, deren Trägersatelliten die Erde meist geostationär oder auf einer Polbahn umrunden. Alle Meteosat-Satelliten werden durch die multinationale Organisation Eumetsat mit Satz in Darmstadt betrieben, der neben den EU-Staaten auch Norwegen, die Schweiz und die Türkei angehören. Nach den ersten sieben Meteosat-Trabanten ist von der Nachfolgegeneration derzeit Meteosat 8 in Betrieb. Der nächste in der Reihe, Meteosat 9, soll in Kürze, am 30. August 2005, in Kourou in Französisch-Guayana starten.

Die Meteosat-Satelliten rotieren um die eigene Achse, um sie im Raum zu stabilisieren; zugleich umrunden sie die Erde geostationär auf ihrer Bahn in 36000 Kilometer Höhe. Die Winkelgeschwindigkeit von Satelliten auf der geostationären Bahn entspricht der Erdrotation, weshalb ihre Radiometer immer den gleichen Ausschnitt der Erde abtasten. Ein Abtastzyklus dauert 15 Minuten. Die Erdkrümmung limitiert die Sicht der Satelliten aus der Äquatorebene zu den Polen hin natürlich. Jenseits der Polarkreise bei 66 Grad geografischer Breite sind die Daten wegen des äußerst schrägen Blickwinkels also kaum verwertbar. Der Satellit steht dort für einen Beobachter an der Erdoberfläche nur noch weniger als 20 Grad über dem Horizont; das entspricht der mittäglichen Sonnenhöhe im mitteleuropäischen Winter.

Auf dem Meteosat 8 arbeitet das schmalbandige passive Radiometer Seviri *(Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager)* sowie das passive Breitbandradiometer Gerb (*Geostationary Earth Radiation Budget*, 0,4 bis 30 Mikrometer). Während Gerb die kurz- und langwelligen Komponenten der irdischen Strahlung bestimmt und somit einen direkten Beitrag zur Klimaüberwachung leistet, finden Seviri-Daten zunehmend in der operationellen Wettervorhersage Anwendung.

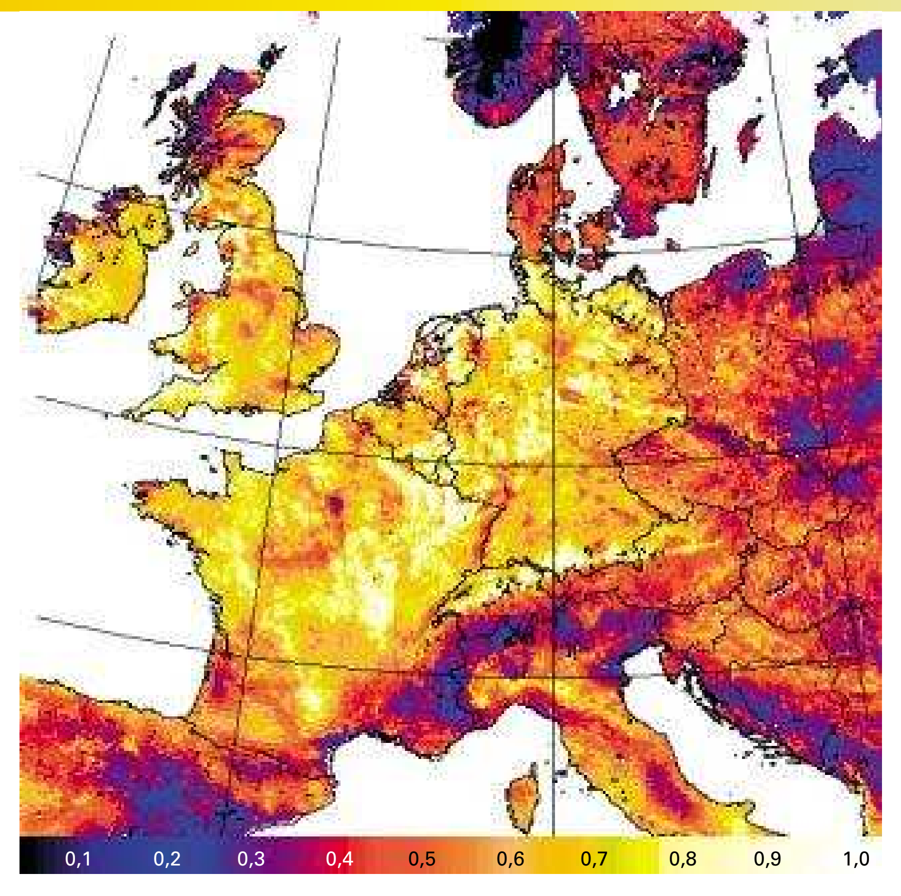
Polarüberflüge alle 101 Minuten

Die derzeit wichtigsten aktiven Satelliten, die auf Polbahnen um die Erde kreisen, werden von der US-amerikanischen Wetterbehörde Noaa betrieben. Deren Bahnen sind quasisonnensynchron, das heißt die Überflugszeiten über jedem bestimmten Ort auf der Erdoberfläche sind immer etwa gleich. Auf Grund der weitaus niedrigeren Flughöhe im Vergleich zu Meteosat – zwischen 700 und 900 Kilometern – ist der abgetastete Bereich zwar sehr viel kleiner, doch lässt sich mit zeitlich aufeinander folgenden Überflügen schließlich auch mit diesen Trabanten die Erde global überdecken.

Die Polarregionen werden alle 101 Minuten wieder abgetastet. Am Äquator dauert es jedoch 12 Stunden, bis ein bestimmter Ort wieder überflogen wird. Zur Instrumentierung gehören auch hier passive Radiometer. An Bord der Noaa-Satelliten arbeiten Messkanäle im Sichtbaren und Infrarot mit einer räumlichen Auflösung von 1,1 Kilometer im Punkt senkrecht unterhalb des Satelliten. Eine neue Generation passiver abbildender Radiometer kommt auf den Satelliten Terra und Aqua zur Anwendung: Die Geräte mit 36 statt bisher sechs Spektralkanälen überdecken den Bereich vom sichtbaren Licht bis zum mittleren Infrarot.

Für die Wettervorhersage mit Hilfe von Satellitendaten sind in letzter Zeit besonders drei Anwendungen bedeutsam geworden. Für die subjektive Analyse setzen wir so genannte Mehrfachkombinationen ein, bei denen Daten aus mehreren Wellenlängenbereichen überlagert

◀ **Kürzestfristvorhersagen für Europa, abgegeben am 4. Juni 2005, 12.00 Uhr MEZ: Mit dem so genannten Nowcasting können Meteorologen unterschiedliche Wetterzustände prognostizieren (von oben nach unten): Wolken, Temperatur, Regen und die Neigung zu lokalen Schauern und Gewittern**



Wie grün ist Europa? Jedes Pixel von einem Kilometer Kantenlänge markiert für die letzte Aprilwoche dieses Jahres den Bedeckungsgrad durch Pflanzen von 0 bis 1 (entsprechend 0 bis 100 Prozent). Dunkle Flächen sind gering, helle Flächen stark bewachsen.

wurden. Eine Diagnose des Atmosphärenzustands liefert uns dann meteorologische Parameter, die aus den Primärdaten mit automatischen Verfahren errechnet werden. Sie vermitteln uns die räumliche und zeitliche Veränderung dieser Parameter. Das versetzt uns in die Lage, eine Prognose für kürzeste Zeiträume – bis zu drei Stunden – aufzustellen. Das ist das heute in Fachkreisen so genannte *Nowcasting*.

Intuitive Erfassung des ganzen Wetters auf einen Blick

In der Europakarte auf S. 43 ist die spektrale Albedo aus den Farben Rot, Grün und Blau überlagert. Das Resultat – eine Aufnahme vom 2. März 2005 – kann das menschliche Auge auch intuitiv deuten: Je nach Vegetation erscheinen die Landoberflächen braun bis grün, Wasser wirkt dunkelblau bis schwarz. Wolken können nach dem (aus Sicht des Satelliten gesehen) dominierenden Aggregat Wassertröpfchen (rosa bis weiß) oder Eiskristalle (türkis) unterschieden werden. Aufliegender Schnee oder Eis erscheint ebenfalls türkis, kann von Eiswolken jedoch leicht durch deren wolkenförmige Textur und durch die Animation aufeinander folgender Bilder separiert werden.

Dieses Bild zeigt die Vielfalt des europäischen Wetters: Weite Teile Mittel-, Ost- und Nordeuropas sowie auch die Mittel- und Hochgebirge Südeuropas lagen Anfang März, zum Zeitpunkt der Aufnahme, unter einer Schneedecke. Deutlich heben sich davon die schneefreien (bräunlichen) Gebiete ab, so etwa das ungarische Tiefland, Südfrankreich oder Oberitalien. Über dem Nordatlantik sind tiefe Stratokumulus- und Kumuluswolken zu erkennen. Zum europäischen Festland hin nimmt die Wolkenvereisung zu. Norddeutschland und Teile Frankreichs liegen an diesem Tag unter meist in große Höhen aufsteigende Bewölkung.

Nowcasting bezeichnet die Wetterüberwachung und -vorhersage für den Kürzestfristbereich, das heißt für die nächsten ein bis drei Stunden. Sobald wir eine bestimmte meteorologische Variable zu mehreren Zeitpunkten hintereinander (»Zeitreihe«) kennen, können wir daraus ziemlich einfach auch die nahe Zukunft extrapolieren.

Dies geschieht unter Nutzung des aus dem bisherigen zeitlichen Verlauf abgeleiteten Trends oder auch durch Anwendung statistischer Verfahren, die frühere Entwicklungen zu Wahrscheinlichkeitsaussagen verdichten.

Insbesondere wenn eine akute Wetterentwicklung von den numerischen Modellvorhersagen nicht erfasst ist, muss im Vorhersagedienst auf Nowcasting umgestellt werden. Das gelingt uns natürlich nur, wenn alle Messdaten möglichst flächendeckend und in zeitlich dichter Folge vorliegen. Deshalb liefern die meteorologischen Parameter, die aus Daten der geostationären Satelliten abgeleitet werden, einen wichtigen Beitrag für ein erfolgreiches Nowcasting. Denn die Messwerte dieser Trabanten überdecken ein Gebiet vom Äquator bis zu den mittleren Breiten (etwa 60 Grad) und bei den polumlaufenden Satelliten komplementär dazu die Erdteile von etwa 60 Grad bis zu den Polen (siehe S. 44).

Für eine moderne Wettervorhersage ist also Nowcasting von großem Nutzen, nicht zuletzt aber auch dafür, eventuelle Fehlprognosen in unseren Modellrechnungen zu korrigieren. Zudem werden Satellitendaten zunehmend auch als direkter Input für Modellvorhersagen verwendet. Das Resultat ist umso zuverlässiger, je genauer wir den Ausgangszustand der meteorologischen Parameter kennen – eben dafür setzen wir die Satellitenmesswerte ein. Die Ergebnisse zeigen es: Um die globale Verteilung der vertikalen Temperatur- und Feuchtigkeit zu bestimmen, haben Satellitendaten die Prognose vor allem in Regionen und Meeren verbessert, wo es umständehalber wenige Bodenstationen gibt.

Wenn der Wind die Wellen peitscht

Die Eingabedaten hierzu liefern Noaa-Satelliten. Das Europäische Zentrum für Mittelfristprognose ECMWF in Reading bei London übernimmt bei der Computersimulation des planetaren Wettermodells die direkt gemessenen Infrarotdaten sowie Windrichtungen, die aus Wolkenverlagerungen ermittelt werden. Dort, wo die Satellitensensoren ungehindert auf die wolkenlose Erde blicken können, vor allem also im In- ▷

ESA / SILICON WORLD

Im kommenden Jahr wird »Metop« starten, der erste Wettersatellit Europas, der routinemäßig über die Pole fliegen soll. Er verspricht einen weiteren Qualitätssprung in der Wetterprognostik.

frarot, liefern sie auch die Temperatur der Erdoberfläche. Den Wasserdampf, der auch wolkenfreie Bilder verfälschen würde, können wir mit einigen Tricks korrigieren. Über den großen Wasserflächen hingegen gestaltet sich die Temperaturmessung einfacher und damit kann die Temperatur der Meeresoberfläche in die tägliche Wettersimulation einfließen.

Winde an der Meeresoberfläche lassen sich mit satellitengestützten Radargeräten aufspüren, deren Sendestrahl von Wasserwellen gestreut wird. Je stärker Winde die Wellen aufpeitschen, desto deutlicher zeigt dies der reflektierte Radarstrahl. Ähnlich wie bei einer Geschwindigkeitskontrolle im Straßenverkehr verschiebt der Dopplereffekt die Radarfrequenz. Das vom Satelliten wieder aufgefangene Signal liefert so Ausbreitungsrichtung, Stärke und Geschwindigkeit der oberflächennahen Wasserwellen, die von Winden der unteren Troposphäre angetrieben werden.

Im Strahlungshaushalt von Erde und Atmosphäre ist auch der Energieaustausch zwischen Bodenschicht und atmosphärischer Grenzschicht enthalten. Die reflektierte Sonnenstrahlung hängt natürlich stark von der Bodenart ab, insbesondere vom Anteil der photosynthetisch aktiven Vegetation. Mit diesem Signal können wir den variablen Grad der Vegetationsbedeckung eines jeden Bildelements bestimmen – eine mathematische Modellierung des Pflanzenbewuchses. So speisen wir Wälder, Wiesen und Landwirtschaft in die Simulation von Austauschprozessen in der atmosphärischen Grenzschicht ein (siehe S. 44).

Dies ist der heutige Stand der Wetterprognostik, wie er von Satellitendaten beeinflusst und getragen wird. Bei der Erfassung des Atmosphärenzustands schließen Satelliten unvermeidliche oder aus Kostengründen erzwungene Datenlücken. Wir profitieren davon für Bildanalyse, Deduktion meteorologischer Informationen und numerische Modellierung. Für unser Alltagsgeschäft, bis abends etwa den Fernsehzuschauern eine zuverlässige Wettervorhersage zu liefern, sind Satelliten längst unverzichtbar geworden.

Derzeit geht es den Meteorologen darum, das Vorhersagepotenzial mit Daten von Satelliten der neuen Generation – Meteosat 8 und demnächst Meteosat 9 – voll auszuschöpfen. Doch auch auf dem Gebiet der polumlaufenden Systeme gibt es Bewegung: »Metop« wird der erste europäische Routinesatellit sein, der über die Pole fliegt; er soll im zweiten Quartal 2006 abheben. Bestückt mit acht modernen Messgeräten, lässt dieser Trabant einen weiteren Qualitätssprung in der Wettervorhersage erwarten. ◁

AUTOREN UND WEBLINKS





Ralf Becker ist Diplommeteorologe und arbeitete von 2000 bis 2003 am Aufbau einer satellitengestützten Wolkenklimatologie beim Deutschen Wetterdienst. Seit 2004 befasst sich Becker mit Nowcasting sowie der Bestimmung von Erdoberflächenparametern, die aus Satellitendaten gewonnen werden. **Oliver Sievers** ist promovierter Diplommeteorologe und arbeitet seit 1998 im Bereich der Fernerkundung mit Schwerpunkt Satellitenmeteorologie, zunächst beim GKSS Forschungszentrum Geesthacht, seit 2003 beim Deutschen Wetterdienst.

www.eumetsat.int
www.esa.int
www.nesdis.noaa.gov

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

WITTERUNGSPROGNOSE

Wie wird der nächste Sommer?


Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Seriöse Jahreszeiten-Vorhersagen sind im Kommen. Das launenhafte Wetter in Europa macht es den Meteorologen aber nicht leicht.

Von Sven Titz

Ende Mai wartete die Zürcher Sonntagszeitung mit einer ungewöhnlichen Meldung auf: »Erstmals gibt der nationale Wetterdienst eine Sommer-Langzeitprognose bekannt«, titelte das Blatt und kündigte an: »Rund ums Mittelmeer wird es mit 60- bis 80-prozentiger Wahrscheinlichkeit überdurchschnittlich warm«. Durchwachsener gestalte sich die Witterung im Land der Eidgenossen selbst: »Der nächste Sommer in der Schweiz wird bloß mittelmäßig«, erklärte die Zeitung – nicht ohne eine gewisse Skepsis: Obschon der Wetterdienst jede Prognose mit einer Wahrscheinlichkeit versehen habe, erschienen die Behauptungen doch eher gewagt.

Dennoch: Schon bald könnten Vorhersagen des nächsten Sommers oder Winters zum Standardservice gehören, den Meteorologen anbieten – zum großen Nutzen von Landwirten, Hoteliers, Versicherungen und vielen Unternehmern. Die Wetterfachleute gehen damit über ihren bisherigen Zeithorizont hinaus: Sie schließen vom Wetter zur Witterung auf. Darunter verstehen Meteorologen nicht etwa ein gutes Näschen für ein aufziehendes Gewitter oder Schneegestöber, sondern das über mehrere Tage bis Monate gemittelte Wetter.

Die Witterung im nächsten Sommer oder Winter müsste sich in den mittleren Breiten zumindest der Tendenz nach vorhersagen lassen, glauben viele Wissenschaftler. Recht zuversichtlich sind dabei die Mitarbeiter des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) in Shinfield Park bei Reading (England). MeteoSchweiz und der Deutsche Wetterdienst kooperieren mit ihnen in einer europäischen Pilotstudie. Allerdings ist Europa in Sachen Witterungsprognose ein schwieriges Pflaster. Anderswo herrschen günstigere Bedingungen. Deshalb sind saisonale Vorhersagen – für eine ganze Jahreszeit – in manchen Weltregionen sogar schon teilweise üblich, zum Beispiel in Südamerika.

Peru, im Frühling 1997: Die Wassertemperaturen im Pazifik zeigen ein verdächtiges Muster – die National Ocean

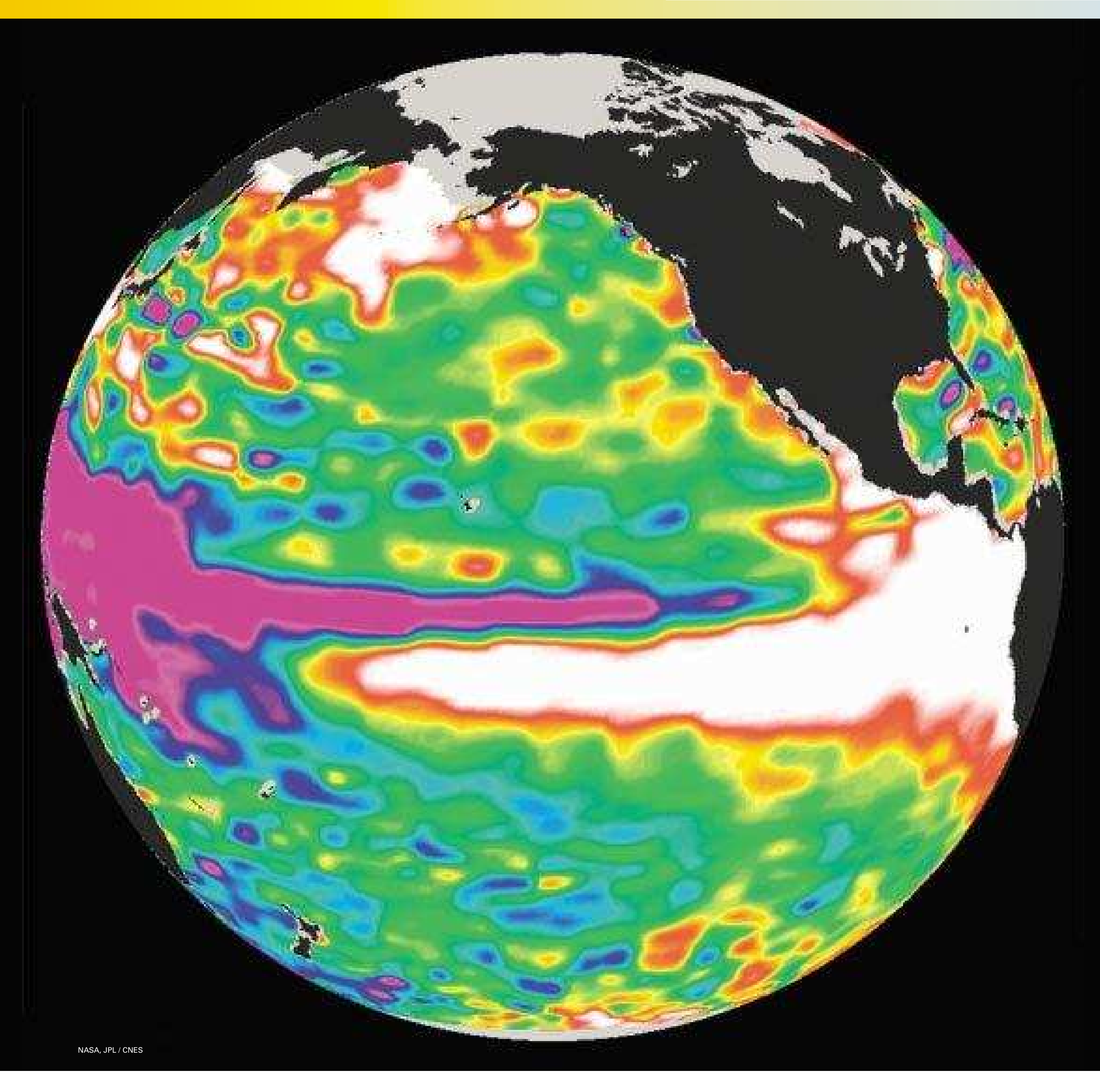
Neptuns Gedächtnis

Die Verhältnisse in der Atmosphäre ändern sich schnell, sehr viel schneller als im Ozean. Schon nach zwei bis sechs Wochen besteht keinerlei Beziehung zur Ausgangssituation mehr. Die Vergesslichkeit der Lufthülle ist also groß – besonders in den mittleren Breiten.

Ganz anders beim Meer: Je tiefer man in den Ozean eintaucht, desto länger bewahren die Wassermassen ihre Temperatur und ihren Salzgehalt. Selbst in den obersten hundert Metern dauert es Monate, bis sich die Bedingungen deutlich verändern. In den mittleren Ozeanschichten bis tausend Meter Tiefe brauchen Anpassungen sogar ein bis fünf Jahre und darunter Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Durch diese Trägheit wirken die Wassermassen der Ozeane wie ein gigantisches Gedächtnis für die Atmosphäre. Indem die Meeresoberfläche die Luft erwärmt oder abkühlt, hemmt oder begünstigt sie langfristig die Entstehung der unterschiedlichen Großwetterlagen. Friert etwa die Ostsee im Winter schon früh weit gehend zu, bildet sich über der Eisfläche eine riesige Kaltluftmasse. Das fördert die Entwicklung eines Skandinavienhochs, das Mitteleuropa einen sehr kalten Winter bringt.

Selbst an der Meeresoberfläche bleiben die Temperaturen ziemlich konstant und ändern sich nur innerhalb von Wochen. Darum stützen die Witterungsprognostiker ihre Vorhersage auf Computermodelle, die mit der Atmosphäre zugleich auch den Ozean simulieren. Noch frisst diese Prozedur kostbare Rechenzeit. Nimmt die Leistung der Computer aber im bisherigen Tempo zu, dürfte das bald kein Problem mehr sein.



NASA, JPL / CNES

and Atmospheric Administration der USA (NOAA) schlägt daraufhin Alarm. Schon im März warnen die Wissenschaftler vor einem El-Niño-Ereignis im kommenden Winter. Die Kollegen vom EZMW waren sogar noch schneller: Sie haben die Vorzeichen bereits im Januar erkannt. Zu diesem Zeitpunkt – ein Dreivierteljahr im Voraus – erscheint die Prognose kühn. Doch tatsächlich: Gegen Ende des Jahres liegen die Wassertemperaturen vor der Küste rund fünf Grad über dem Durchschnitt. El Niño ist da – und was für einer!

Der Name des Phänomens leitet sich vom spanischen Wort für das Christkind her; denn jedes Jahr zur Weihnachtszeit erwärmt sich das Meer vor der peruanischen Küste. Alle zwei bis sieben Jahre ist diese Anomalie besonders ausgeprägt; dann spricht man von einem El-Niño-Ereignis. Die Folgen sind meist ver- ▷

▲ Das sehr starke El-Niño-Ereignis von 1997 war das erste, das fast ein Jahr im Voraus korrekt vorhergesagt wurde. Auf der Satellitenaufnahme sieht man die Ansammlung ungewöhnlich warmer Wassermassen vor der Westküste Südamerikas (rot bis weiß), während das Meer bei Indonesien sehr viel kühler als normal ist. Die Temperaturschaukel im Pazifik begünstigt die langfristige Witterungsvorhersage in dieser Region.

heerend: An der Westküste Südamerikas kommt es zu schweren Überschwemmungen, während in Indonesien und Australien Dürre herrscht. Die Anomalie kann sich über Wochen und Monate hinziehen. Unwetterbedingte Ernteausfälle lassen den Preis für Nahrungsmittel wie Kokosöl ein Jahr später in die Höhe schießen – so etwa nach dem ungewöhnlich starken El-Niño-Ereignis von 1982.

Damals gab es noch keine langfristige Vorwarnung. Doch in den 15 Jahren bis 1997 konnten Meteorologen und Ozeanografen den Mechanismus der pazifischen Temperaturschaukel weit gehend enträtseln. Deshalb erkennen sie nun ein knappes Jahr im Voraus, ob Peru, Indonesien und andere Länder sich auf extreme Wetterlagen einstellen müssen. El Niño ist somit zum Paradebeispiel dafür geworden, dass saisonale Vorhersagen wirklich funktionieren.

Die europäische Witterung dagegen schlägt den Meteorologen noch regelmäßig ein Schnippchen. Der Hauptgrund liegt im hiesigen Meer. Anders als im tropischen Südpazifik gibt es im Nordatlantik kein mehrjähriges Wechselbad, mit Temperaturschwankungen an der Oberfläche von fünf Grad und mehr, das die Vorgänge in der Lufthülle entscheidend mitbestimmt. Hinzu kommt, dass Wetter und Witterung in unseren Breiten viel stärker variieren als in den Tropen, erläutert der Meteorologe Timothy Stockdale vom EZMW. Wir sind fast völlig der Atmosphäre ausgeliefert, die sich bei uns, am Schauplatz des turbulenten Austauschs kalter polarer und heißer subtropischer Luft, besonders launisch verhält.

Die Rolle der Randbedingungen

Kaum ein Forscher glaubt folglich ernsthaft, dass eine Witterungsprognose für Europa so präzise und treffsicher sein kann wie die Wettervorhersage für die nächsten Tage, meint Antje Weisheimer, eine Institutskollegin Stockdales, die bis vor Kurzem an der Freien Universität Berlin arbeitete. Gleichwohl erscheint die Situation nicht hoffnungslos; denn das Grundprinzip, das die Erfolge im Südpazifik ermöglicht hat, lässt sich auch bei uns anwenden.

Als Basis langfristiger Vorhersagen dienen die so genannten »unteren Randbedingungen« der Atmosphäre. Dazu zählen vor allem die Temperatur der Meeresoberfläche, aber auch die Schneebedeckung, die Bodenfeuchte und die Ausdehnung von Meereis. All diese Größen ändern sich deutlich langsamer als die Lufttemperatur oder gar der Niederschlag. Zudem haben etwa die Meerestemperaturen – je nach Tiefe der Wasserschicht – ein Gedächtnis von Monaten bis zu vielen Jahren, während das Wetter schon innerhalb von ein bis zwei Wochen vergisst, wie es einmal war.

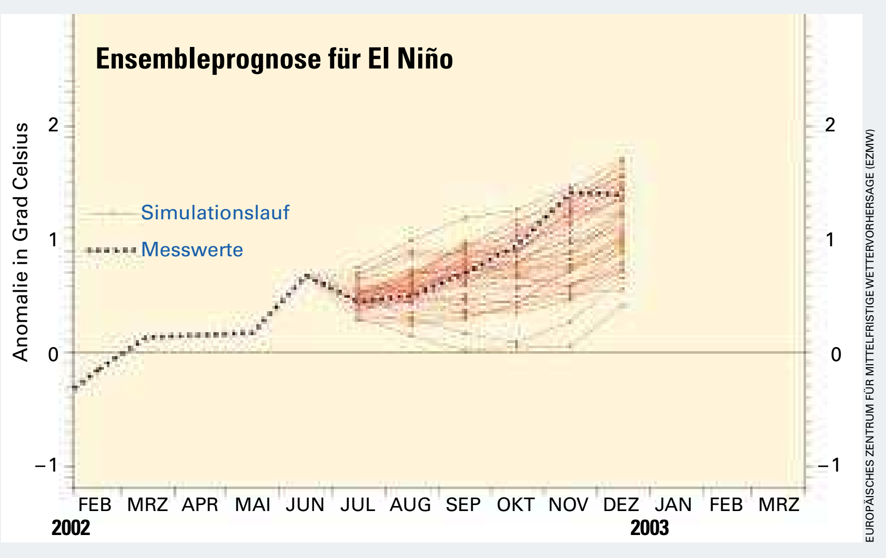
Dank dieser Beharrlichkeit sind die unteren Randbedingungen in gewissem Ausmaß berechenbar. Zugleich können sie enorme Auswirkungen haben, wie man an El Niño sieht. Dessen Einfluss

Zwei Wege zu einem Ziel

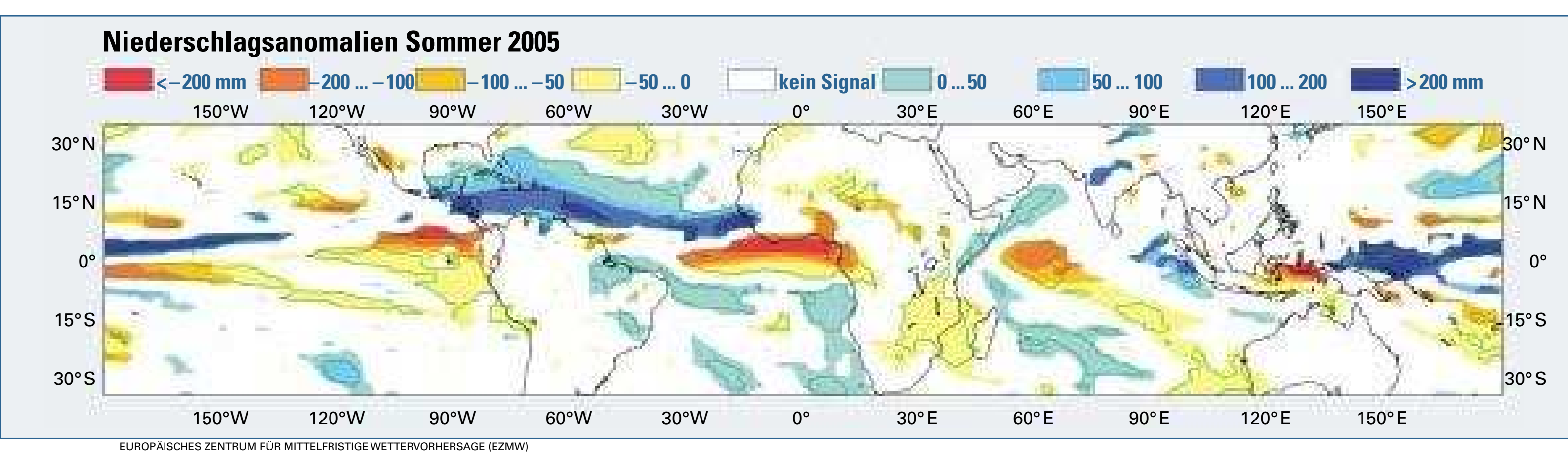
Derzeit gibt es zwei konkurrierende Methoden zur Witterungsprognose. Die eine beruht auf einem Bündel von Computersimulationen, wie auch die normalen meteorologischen Dienste sie verwenden, und heißt Ensemblevorhersage. Die andere nutzt Wetteraufzeichnungen: Wenn ein statistischer Zusammenhang zwischen meteorologischen Phänomenen besteht, lassen sich daraus Schlüsse auf die künftige Witterung ziehen.

Für die Ensemblevorhersage verwenden die Meteorologen gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle. Besondere Bedeutung kommt dabei jenen atmosphärischen Randbedingungen zu, die sich nur relativ langsam ändern. Dazu gehört zum Beispiel die Eisbedeckung oder die Meerwassertemperatur. So bewirkt ein besonders warmer Atlantik, dass sich tendenziell andere Wetterlagen einstellen als normalerweise.

Um zufällige Schwankungen auszumitteln und damit die Zuverlässigkeit der Prognose zu erhöhen, lassen die Meteorologen ihre Modelle bei gleich bleibenden Randbedingungen wiederholt mit leicht unterschiedlichen atmosphärischen Ausgangsparametern laufen – zum Beispiel einem geringfügig geänderten Wert für Luftdruck oder -temperatur an einem Gitterpunkt in Island. Weil meteorologische Vorgänge sehr empfindlich gegenüber den Anfangsbedingungen sind, liefert der Rechner bei jeder solchen Modifikation eine etwas andere Prognose. Die wahrscheinlichste Entwicklung des Wetters während der kommenden Monate ent-



Im Mittel ergaben die Anfang Juli 2002 mit leicht abgewandelten Ausgangsparametern durchgeführten Simulationen (rote Kurven) ein relativ schwaches El-Niño-Ereignis für die Jahreswende. Die tatsächliche Temperaturanomalie im tropischen Ostpazifik (gestrichelte Kurve) fiel etwas stärker aus, als nach dieser Ensembleprognose zu erwarten war.



EUROPÄISCHES ZENTRUM FÜR MITTELFRISTIGE WETTERVORHERSAGE (EZMW)

reicht sogar bis nach Europa – beispielsweise regnet es im Frühling nach einer solchen Anomalie in England, Belgien und den Niederlanden mehr als sonst, wie das International Research Institute for Climate Prediction (in Palisades, Bundesstaat New York) herausgefunden hat. Außerdem hing die Serie extrem strenger Winter von 1939 bis 1942 nach neuesten Erkenntnissen mit einem besonders starken El-Niño-Ereignis zusammen (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 16). Wenn Experten wie Stockdale und Weisheimer die Witterungstendenz in Europa prognostizieren wollen, bauen sie aber nicht ausschließlich auf solche empirischen Zusammenhänge.

Wie pirschen sich Meteorologen an die saisonale Vorhersage heran? Natürlich vom Gegenstand ihrer tagtäglichen Beschäftigung her: vom Wetter. Die gewöhnliche Computerprognose für die nächsten Tage beruht auf möglichst genauen und umfassenden Messdaten von der ganzen Erde. Für die Güte der Wettervorhersage spielen die atmosphärischen Anfangsbedingungen die entscheidende Rolle. Ihr Einfluss schwindet jedoch umso mehr, je weiter die Meteorologen in die Zukunft blicken möchten. Deshalb ist eine exakte Vorhersage mehrere Wochen im Voraus – für einen bestimmten Ort und Tag – derzeit völlig unmöglich. Das heißt aber nicht, dass sich gar keine Aussage machen lässt.

Schnelle Atmosphäre, träger Ozean

Die sehr allgemein gehaltene Prognose, ob der nächste Winter oder Sommer zu kalt oder zu warm, zu nass oder zu trocken ausfallen wird, erscheint sehr wohl realistisch. Schon heute ist zum Beispiel bekannt, dass eine kalte und stabile Winterwetterlage über Mitteleuropa unwahrscheinlicher ist, wenn die Wassertemperaturen der Ostsee im Dezember höher liegen als normal. Selbst die Meerestemperaturen in den weit entfernten Tropen wirken sich stark auf die europäische Witterung aus.

Weil Wasser eine höhere Wärmekapazität als Luft hat und deutlich langsamer strömt, ändert sich diese Randbedingung des Wetters nur gleichsam in Zeitlupe. Durch den Austausch von Wärme und Feuchtigkeit mit der Atmosphäre übt der Ozean aber einen dauerhaften Einfluss auf die variablen Wetterlagen aus – manche werden wahrscheinlicher, andere unwahrscheinlicher. Ähnliches gilt für die Bodenfeuchte. Schon im Frühjahr 2003 war es zum Beispiel in Deutschland und in Skandinavien ziemlich trocken – der Rekordsommer in Mitteleuropa hatte quasi ein Vorspiel. Damit stieg die Wahrscheinlichkeit einer Dürre gegenüber einem Durchschnittsjahr. Aus sehr trockenem Boden kann schließlich weniger Wasser verdunsten, sodass die Sonneneinstrahlung die Atmosphäre effizienter aufheizt, als wenn die Erde nass ist: Die Trockenheit erhält sich selbst aufrecht.

Aber auch wenn man die Randbedingungen einbezieht, liefert eine einzelne Computersimulation noch keine verlässliche Witterungsprognose. Wer herausfinden will, ob ein Roulettespiel gezinkt ist, kann sich ja auch nicht mit einem einzigen Wurf der Kugel begnügen. Aus diesem Grund benutzen die Experten vom EZMW so genannte Ensembleprognosen. Darunter versteht man die wiederholte Vorhersage mit dem Computermodell eines Wetterdiensts, wobei jede Simulation mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen startet. So lässt sich das wahrscheinlichste ▷

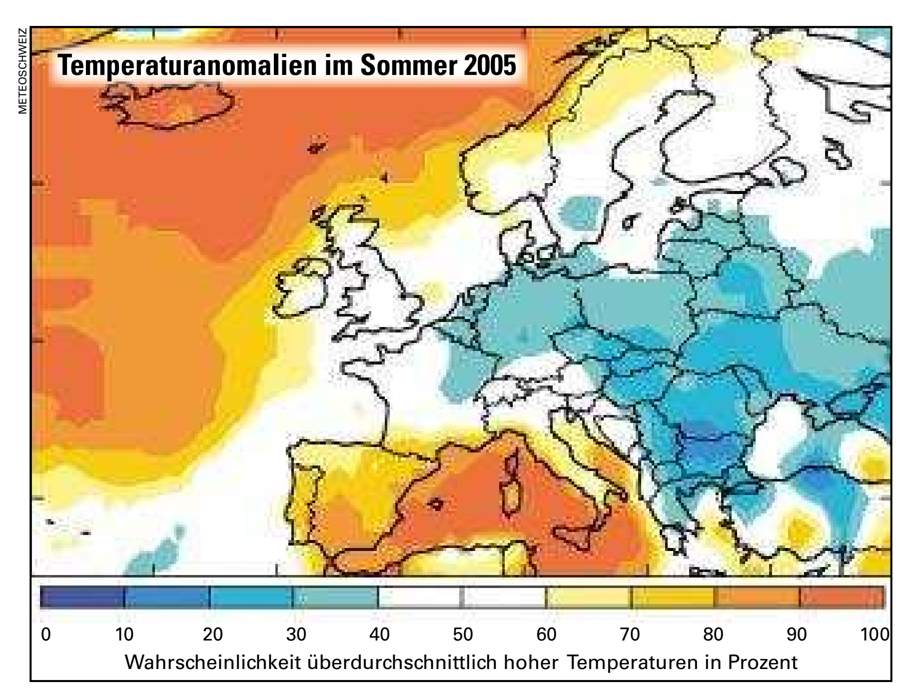
▲ Für diesen Sommer hat das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage Mitte Mai die hier abgebildete Prognose über die zu erwartenden Abweichungen der weltweiten Niederschläge von den Durchschnittswerten erstellt. Demnach sollte es zum Beispiel in der Karibik feuchter sein als normal.

spricht dann dem Durchschnittsergebnis aller Simulationen.

Eine besonders viel versprechende Neuentwicklung bei der Ensemblevorhersage beruht auf der Nutzung verschiedener Modelle anstatt verschiedener Anfangsbedingungen. Durch die Bündelung von Computersimulationen mehrerer Wetterdienste gleichen sich die systematischen Fehler der einzelnen Modelle aus. Dies wird unter anderem im EU-Projekt »ENSEMBLES« getestet.

Die statistische Methode ähnelt den Bauernregeln. Die aus Messdaten ermittelten Korrelationen – zum Beispiel zwischen Meerestemperaturen und Niederschlag – werden allerdings mathematisch überprüft. Seit Längerem dient diese Methode in Indien zur Vorhersage des Monsuns.

Die Computermodelle laufen den statistischen Methoden allmählich den Rang ab. Das freut die Experten; denn die Simulationen gehorchen den physikalischen Gesetzen, weshalb sich Wetterprozesse mit ihnen auch meteorologisch interpretieren lassen.



Auch diese Karte der voraussichtlichen Abweichungen der diesjährigen Sommertemperaturen von den Mittelwerten in Europa stammt vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage. Danach wird es im Mittelmeerraum besonders heiß, in Deutschland dagegen eher kühl.

Szenario bestimmen. Das Verfahren wird auch für die kurzfristige Wettervorhersage eingesetzt, wo es für Zeiträume von fünf Tagen recht gute Ergebnisse liefert.

Für saisonale Prognosen aber reichen die normalen Atmosphärenmodelle nicht aus, da sie die unteren Randbedingungen und deren Entwicklung nicht berücksichtigen. Deshalb setzen die Fachleute am EZMW bei ihren Simulationen zusätzlich ein Ozeanmodell ein, das auch den Verlauf der Meerestemperaturen prognostiziert. Das Vorgehen kostet allerdings sehr viel Rechenzeit – zumal in Verbindung mit Ensemblevorhersagen. Doch ist es die einzige Art und Weise, mit Computerhilfe Witterungsprognosen zu erstellen.

Monsun und Himalaya-Schnee

Wie immer die Meteorologen zu ihrem Ergebnis gekommen sind – saisonale Vorhersagen versprechen einen enormen Nutzen. Zum Beispiel Indien: Wenn der Monsun schwächer ausfällt als normal, können sich die Bauern bei frühzeitiger Prognose darauf einstellen und trockenresistente Pflanzenarten anbauen. Heute schon sagen indische Meteorologen voraus, wann die Monsunregen beginnen und wie stark sie werden. Die Verlässlichkeit lässt allerdings noch zu wünschen übrig: Das Aussetzen des Monsuns samt nachfolgender Dürre im Sommer 2002 etwa kam völlig überraschend.

Auch in Indien spielen die unteren Randbedingungen der Atmosphäre eine große Rolle. Beispielsweise beeinflusst die Ausdehnung der schneebedeckten Flächen im Himalaya die Regenfluten des Monsuns. Solche Zusammenhänge lassen sich freilich auch ohne Computermodelle nachweisen; Korrelationsrechnungen genügen. Deshalb geben die indischen Meteorologen bei der Witterungsprognose der statistischen Methode noch den Vorzug vor der viel aufwändigeren Ensemblevorhersage.

Dasselbe gilt für Peter Webster und seine Mitarbeiter am Georgia Institute of Technology. Über rein statistische Zusammenhänge berechnen sie etwa zwanzig bis dreißig Tage im Voraus, wie stark die Monsunregen in Indiens Nachbarland Bangladesch sein werden. Behörden nutzen diese Prognosen bereits; bis zu den Bauern dringen die Informationen jedoch noch nicht vor. Diese müssten erst lernen, mit den Wahrscheinlichkeitsaussagen umzugehen, erklärt Webster.

Auch in den USA, deren Küsten jedes Jahr von Wirbelstürmen bedroht werden, sind statistische Methoden noch das Mittel der Wahl, um abzuschätzen, ob die kommende Hurrikansaison eher dramatisch oder harmlos ausfallen wird. Wie Mark A. Saunders und Adam S. Lea vom Benfield Hazard Research Centre in London kürzlich herausgefunden haben, scheint sich die Hurrikanaktivität vorhersagen zu lassen, wenn man die Abweichungen der Windverteilung vom klimatologischen Julimittel unter die Lupe nimmt. So verheißungsvoll dies besonders für die Versicherungsindustrie klingt – erst muss sich zeigen, wie gut die Methode tatsächlich funktioniert; denn die britischen Forscher haben in ihrer Studie nur historische Hurrikane nachträglich »prognostiziert«.

Den Launen des europäischen Wetters zum Trotz ist die saisonale Vorhersage auch in Deutschland im Kommen: Der Deutsche Wetterdienst (DWD) testet derzeit Prognosen über einen Zeitraum von maximal fünf Monaten und arbeitet dabei mit Energiekonzernen wie RWE, EON oder Vattenfall zusammen. Die Rohdaten stammen vom EZMW und werden vom DWD für die Kunden aufbereitet, wie Kai Biermann von der Vertriebsaußenstelle Hamburg erklärt.

Mit der Vorhersage von Mitteltemperaturen scheinen die Unternehmen momentan ganz zufrieden zu sein: Sie können die Angaben zur Abschätzung des Energiebedarfs nutzen. Die Öffentlichkeit erfährt von den noch ziemlich unsicheren Prognosen bisher allerdings nichts – die Verbesserung gegenüber bloßem Raten ist dafür zu gering. Etwas Geduld müssen wir also doch noch aufbringen, bis es nicht mehr nur in Schweizer Zeitungsnachrichten heißt: »Der nächste Sommer wird …«

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



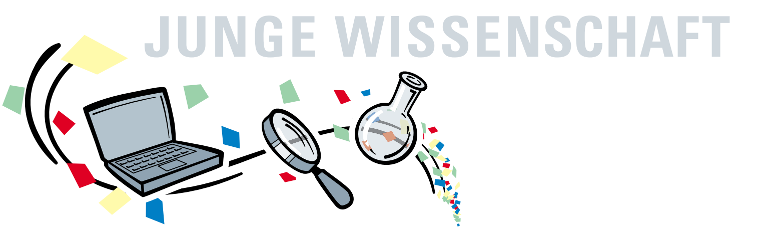
Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Simulation und Vorhersage von ENSO-Extremen. Von Mojib Latif in: Promet, Jg. 29, S. 72, Juni 2003

Seasonal prediction of hurricane activity reaching the coast of the United States. Von Mark A. Saunders und Adam S. Lea in: Nature, Bd. 434, S. 1005, 21. 4. 2005

Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. Von Lisa Goddard et al. in: International Journal of Climatology, Bd. 21, S. 1111, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



»Jugend forscht« – der 40. Bundeswettbewerb (II)

Jungforscher entwickelten ein Kanalkriechgerät, einen Gehirnwellentrainer und ein Rekonstruktionsverfahren für räumliche Strukturen.

Von Christoph Pöppe

Dieser zweite Teil des Berichts vom Bundeswettbewerb würdigt einige – wenige – weitere herausragende Leistungen etwas ausführlicher. Willkür bei der Auswahl ist unvermeidlich.

Für ihr Kanalkriechgerät ließen sich Björn Liebaug (18) aus Stadtilm und Martin Hertel (18) aus Arnstadt (Thüringen) sowie Roland Koch (17) aus Bruckmühl (Bayern) von einem natürlichen Vorbild inspirieren: Der Regenwurm hat keine Beine, sondern nur Borsten, die einer Rückwärtsbewegung mehr Widerstand entgegensetzen als einer Vorwärtsbewegung. Der Regenwurm kontrahiert einige seiner zahlreichen Körpersegmente nahe seinem Vorderende und verdickt sie dadurch. Die verdickte Stelle haftet besser an der Umgebung als die anderen, sodass die weiter hinten liegenden Körperteile durch die Verkürzung ein Stück nach vorn gezogen werden. Während die Verdickung von vorn nach hinten durch den Körper wandert, strecken sich die vorn liegenden Körperteile wieder, woraus sich eine Vorwärtsbewegung ergibt.

Der künstliche Regenwurm

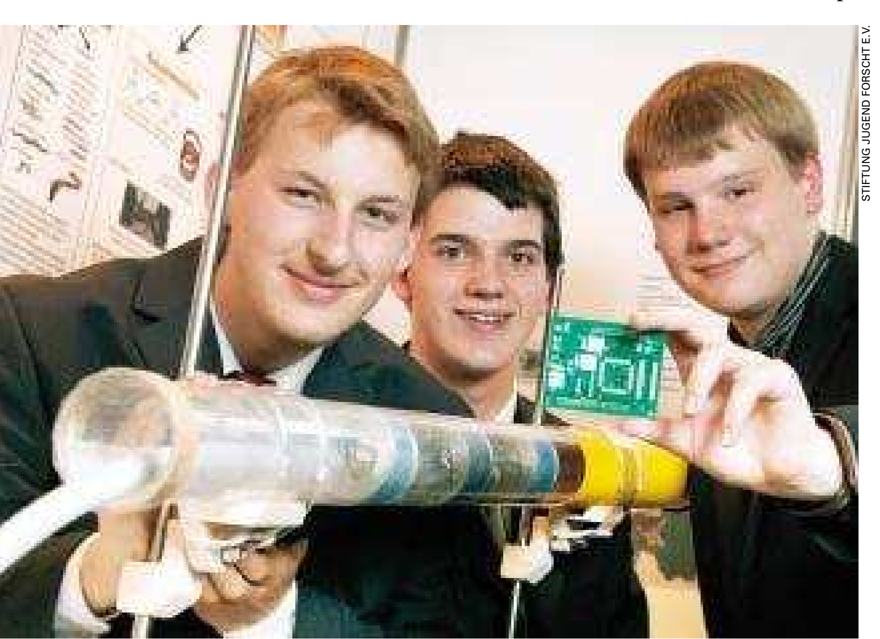
Die beiden Dinge, die der Regenwurm gleichzeitig erledigt, lassen die drei Jungtechniker von verschiedenen Bauteilen ausführen. Für das Strecken und Verkürzen verwenden sie Kolben in Hohlzylindern: Eingeblasene Druckluft fährt sie aus, eine Schraubenfeder holt sie nach Ablassen der Luft in den kurzen Ruhezustand zurück. Das Verdicken und damit das Abstemmen an der Umgebung übernehmen Luftkissen, die ebenfalls mit Druckluft aufgeblasen werden.

Drei Zylinder und drei ringförmige Luftkissen genügen, um die Bewegung des Regenwurms erfolgreich nachzubilden. Mit den Luftkissen stemmt sich der künstliche Wurm so kraftvoll gegen die Wände einer Rohrleitung, dass er auch in einem Fallrohr senkrecht hochkriechen kann. Die benötigte Energie schleppt er in Form von Druckluft in einem Behälter mit. Seine Außenhaut ist bis auf ein kleines Loch zum Ablassen der verbrauchten Luft und einen Schlauch für die Ansteuerungskabel völlig undurchdringlich. Das verschafft ihm Vorteile gegenüber rädergetriebenen Geräten. So kann er sowohl in der Trinkwasserleitung herumkriechen, ohne sie durch austretende Schmierstoffe zu verunreinigen, als auch im Abwasserkanal, ohne dass ätzende Stoffe, Haare oder Kleinpartikel ihm etwas anhaben können. Zwischen den Segmenten ist Platz für eine Kamera oder für Reparaturwerkzeug.

Seine Bewegung lässt sich in eine Folge von Elementarschritten zerlegen, deren jeder im Öffnen und/oder Schließen eines Ventils besteht. Das haben Björn Liebaug, Martin Hertel und Roland Koch auf einem handelsüblichen FPGA-Mikrochip programmiert. Überhaupt besteht der ganze Kunstwurm weit gehend aus gängigen Bauteilen und ist deswegen vergleichsweise kostengünstig.

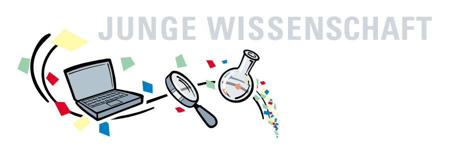
Ob andere Leute schon auf die Idee gekommen sind, weiß man nicht, denn die wenigen Firmen, die daran forschen, waren wenig auskunftsfreudig.

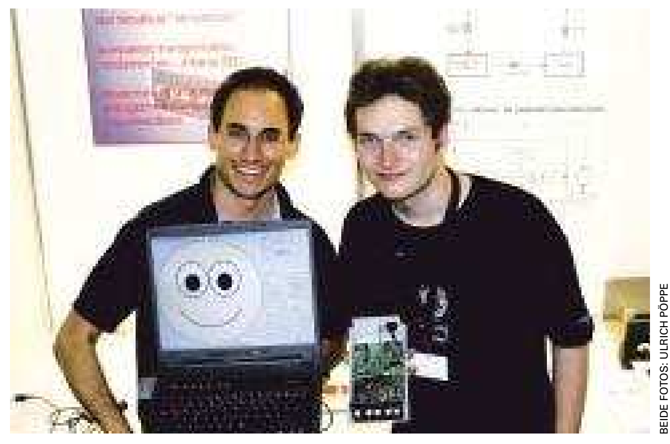
Durch Gelenke würde der Wurm fähig, auch enge Kurven zu durchkriechen. Weitere Varianten des Prinzips ▷



STIFTUNG JUGEND FORSCHT E.V.

▶ **Björn Liebaug, Martin Hertel und Roland Koch (v. l. n. r.) mit ihrem Kanalkriecher in der Röhre (man erkennt die drei blauen Luftkissen).**





BEIDE FOTOS: ULRICH PÖPPE



Der »MindMaster« mit seinen beiden Entwicklern (links); Thomas Bünger (rechts) und Tobias Grelle erproben ihre Rekonstruktionssoftware an Kombinationen einfacher quaderförmiger Objekte.

▷ sind denkbar, bis hin zu einem Miniaturwurm, der in den Rückenmarkskanal kriecht und Schäden an der Wirbelsäule von innen repariert.

Gehirnwellen trainieren

Noch vor wenigen Jahren galt es als eine Sensation mit einem gewissen Gruselfaktor: Mit der richtigen Anleitung lernt der Mensch zu verändern, wie sein eigenes Gehirn tickt, das heißt, er wird fähig, Eigenschaften des eigenen Gehirnzustands willentlich zu beeinflussen. Inzwischen ist diese Technik unter dem (älteren) Namen »Biofeedback« dabei, sich im Medizinbetrieb zu etablieren – und liegt offensichtlich auch schon in der Reichweite ambitionierter Jungforscher.

Es geht um sehr elementare Kenngrößen des Gehirns, die man, mit etwas Rechenarbeit, dem Elektroenzephalogramm (EEG) entnehmen kann. Die kollektive Aktivität großer Anzahlen von Nervenzellen erzeugt elektrische Spannungsschwankungen, die über Elektroden an der Kopfhaut messbar sind. Diese Gehirnwellen treten je nach dem Aktivitätszustand des Gehirns mit verschiedenen Frequenzen auf: Alphawellen mit 8 bis 12 Hertz sind typisch für eine entspannte, aufnahmebereite, eher passive Grundhaltung; die schnelleren Betawellen (12 bis 30 Hertz) sind mit aktivem, angespanntem Nachdenken verknüpft.

Man bringe dem Menschen das gegenwärtige Verhalten seines Gehirns – zum Beispiel die dominierende Frequenz seiner Gehirnwellen – zu Bewusstsein, etwa durch einen Ton, der umso höher wird, je stärker die Alphawellen vertreten sind, oder durch ein auf dem Computerbildschirm erscheinendes Smiley, das mit Erreichen dieses – erwünschten – Alphazustands zunehmend breiter grinst. Der Mensch probiert mit seinem eigenen Gehirn herum, indem er irgendwie anders zu denken versucht, bekommt die Veränderung seines EEGs akustisch oder optisch sofort zurückgemeldet (daher der Name Biofeedback) und lernt so, seinen Gehirnzustand oder jedenfalls die rückgemeldete Größe willentlich zu kontrollieren.

Erreicht er Entspannung, indem er das EEG-Kennzeichen der Entspannung herbeiführt? Anscheinend ja. Jedenfalls ist das der Anspruch mancher Biofeedback-Techniken.

Das EEG mit Elektroden aufnehmen, das gemessene Signal vorverstärken, mit verschiedenen Hoch- und Tiefpassfiltern Störsignale unterdrücken, das analoge Signal in eine Folge digitaler Abtastwerte umwandeln, aus diesen mit der schnellen

»Junge Wissenschaft« – die Zeitschrift

Vor allem, aber nicht ausschließlich an die Teilnehmer des Wettbewerbs »Jugend forscht« wendet sich eine Zeitschrift, die wissenschaftlichen Beiträgen von Autoren bis zum Alter von 23 Jahren vorbehalten ist. Sie heißt »Junge Wissenschaft« (die Namensgleichheit mit dem Titel der vorliegenden Rubrik ist weder zufällig noch beabsichtigt) und erscheint mit jeweils 68 Seiten viermal im Jahr.

Paul Dobrinski, Professor für Physik im Ruhestand an der Fachhochschule Hannover, hat sie vor zwanzig Jahren nach dem amerikanischen Vorbild »BASE« (das inzwischen »Science 21« heißt) gegründet und ist bis heute ihr Herausgeber. Die etwa tausend Abonnenten sind mehrheitlich Lehrer.

Bedeutende Unternehmen der Industrie sponsern die Zeitschrift, indem sie den größten Teil der Gesamtauflage von ungefähr 3000 Exemplaren aufkaufen und bei öffentlichen Veranstaltungen für Jugendliche verschenken.



Neben einigen Kurzmeldungen und Service-Hinweisen besteht der Kern des Hefts aus ausführlichen Artikeln der Jungforscher, die an Tiefe und Detailgenauigkeit den für »Jugend forscht« einzureichenden Arbeiten nicht nachstehen. Die Manuskripte durchlaufen den für Fachzeitschriften üblichen Begutachtungsprozess und gehen so reichlich ein, dass sie im Durchschnitt anderthalb Jahre auf den Abdruck warten müssen.

Junge Wissenschaft
Redaktion: youngkombi GmbH
Hildesheimer Str. 307
30519 Hannover
E-Mail: info@junge-wissenschaft.de
Beiträge an:
Paul.Dobrinski@junge-wissenschaft.de
www.junge-wissenschaft.de

Fourier-Transformation errechnen, wie stark Alpha- und Betawellen darin vertreten sind, und diese Zahlenwerte in die entsprechende akustische oder optische Darstellung umsetzen – das alles haben Niko Hübner-Kosney aus Berlin und Arvid Heise aus Potsdam (beide 21) mit geeigneten Mikroprozessoren, selbst geschriebener Software und etwas Zubehör realisiert. Und schon stehen die Zulassung des Geräts namens »MindMaster« für medizinische Zwecke und die kommerzielle Fertigung im Raum.

Niko Hübner-Kosney diente selbst als Versuchsperson für die Neuentwicklung und hat Interessantes vom Training zu berichten: Wenn man sich dem Alphazustand nähern will, hilft es schon, sich bewusst zu entspannen; aber es hilft nicht allzu viel. Ein wesentlicher Teil des Lernprozesses findet dann statt, wenn das Bewusstsein zwar das Ziel vorgegeben, die Einzelheiten aber längst an das Unbewusste delegiert hat – wie beim Radfahrenlernen.

Von zwei auf drei Dimensionen

Wer in einem Auto um ein Gebäude herumfährt und scharf hinschaut, hat hinterher eine brauchbare Vorstellung von der dreidimensionalen Struktur des Bauwerks. Wenn eine Digitalkamera dasselbe in Form einer kurzen Filmsequenz tut, hat sie also im Prinzip ausreichende Information gespeichert; aber diese zu einem »inneren Bild«, einer dreidimensionalen internen Struktur, zu verarbeiten ist für einen Computer – im Gegensatz zum menschlichen Gehirn – eine notorisch schwierige Aufgabe.

Thomas Bünger (16) und Tobias Grelle (17) aus Berlin haben sich trotzdem daran gewagt und eine Ehrfurcht erregende Menge an Software geschrieben. Das Rohmaterial besteht aus einer Serie von Digitalbildern in bescheidener Webcam-Qualität; daraus filtert der PC Elemente wie zum Beispiel einheitlich gefärbte Flächen oder Kanten heraus, in einer Weise, die der Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn verblüffend ähnlich ist. Der Aufwand ist beträchtlich: An einem Einzelbild rechnet der Computer ungefähr 20 Minuten.

Der nächste Schritt besteht darin, gleiche Elemente in aufeinander folgenden Bildern zu identifizieren. Hier mussten Thomas Bünger und Tobias Grelle verschiedene heuristische Verfahren anwenden; denn von einem Bild zum anderen können wegen schlechter Abbildungsqualität oder Verdeckung durch Vordergrundobjekte Punkte verschwinden oder auch neu auftauchen; alle diese Möglichkeiten wollen im Programm berücksichtigt werden.

Das dreidimensionale Modell, das »innere Bild« des Computers, besteht aus Polyedern, Gebilden, die von ebenen Flächen und geraden Kanten begrenzt sind; alles andere würde den Aufwand maßlos in die Höhe treiben. Daher funktioniert das Programm am besten mit Anordnungen von quaderförmigen Spielklötzen oder dem klassischen DDR-Plattenbau. Es bewältigt sogar das klassizistische Berliner Schauspielhaus, wäre jedoch mit einem Baum aus einleuchtenden Gründen überfordert.

Die Arbeit errang den 2. Preis im Fachgebiet Mathematik/Informatik. Als ich den Jungforschern von professionellen Computergrafikern erzähle, die an ihrem Werk Interesse haben könnten, ernte ich nur mäßige Begeisterung und die Antwort: »Das hat ja noch ein bisschen Zeit; wir sind ja erst in der 11. Klasse.« ◁

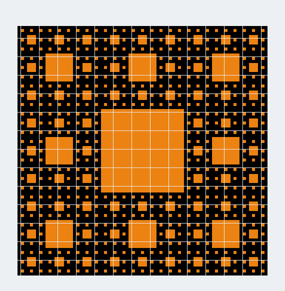
Fraktale Zahlenteppiche

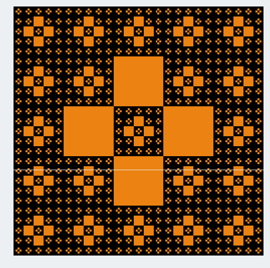
Das ehrwürdige Pascal'sche Dreieck – lauter Zeilen aus natürlichen Zahlen, jede beginnt und endet mit 1, und jede Zahl ist die Summe der beiden über ihr stehenden Zahlen – hat eine verborgene fraktale Struktur. Sie wird sichtbar, wenn man alle Einträge durch dieselbe Zahl, sagen wir 5, dividiert und nur die Reste dieser Divisionen betrachtet (Spektrum der Wissenschaft 8/1993, S. 10).

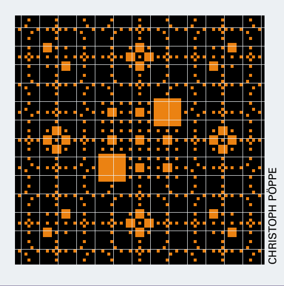
Die so genannten Delannoy-Zahlen bilden eine Variante des Pascal'schen Dreiecks: Sie sind ebenfalls in einem Dreieck mit Einsen an den Rändern angeordnet; nur addiert man für eine Zahl im Inneren nicht nur die beiden Nachbarn in der Zeile darüber, sondern auch deren gemeinsamen Nachbarn noch eine Zeile weiter oben. Legt man die Zeilen schräg, sodass die Ränder des Dreiecks horizontal und vertikal verlaufen, dann ist jede Zahl an der rechten unteren Ecke eines kleinen 2·2-Quadrats die Summe der Zahlen an den drei anderen Ecken. Wenn ein König auf der linken oberen Ecke eines Schachbretts steht und auf die Zugmöglichkeiten »nach rechts«, »nach unten« und »nach rechts unten« beschränkt ist, dann sagt die Delannoy-Zahl auf jedem Feld des Schachbretts an, auf wie vielen verschiedenen Wegen der König dieses Feld erreichen kann.

Alexandra Julier (17) und Christina Flörsch (16) aus Landau beziehungsweise Offenbach in der Pfalz studierten nicht die Delannoy-Zahlen selbst, sondern deren Reste bei der Division durch, sagen wir, 3 (linkes Bild) oder 5 (Mitte). Färbt man Felder mit dem Rest 0 orange und alle anderen schwarz, so springt einem ein fraktales, selbstähnliches Muster ins Auge, das auch auf einem T-Shirt oder einem entsprechend bestickten Sitzkissen sehr dekorativ aussieht. Näheres zur Struktur der Muster herauszufinden gelang den Jungforscherinnen, indem sie quadratische Kästchen aus 5·5 Zahlen zu neuen Einheiten (»Matrizen«) zusammenfassten und ein Bildungsgesetz für Matrizen aufstellten. Ihre Arbeit wurde mit einem 5. Preis in Mathematik ausgezeichnet.

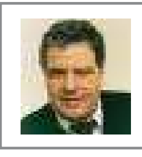
Komplizierter und rätselhafter sind Muster mit einem Divisor, der keine Primzahl ist, wie etwa 9 (rechts).







CHRISTOPH PÖPPE



AUTOR

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Was heizte die Planetoiden auf?

Viele Kleinplaneten wurden in ihrer Frühzeit durch thermische Einflüsse umgewandelt – neue Indizien sprechen dafür, dass Kollisionen dieser felsigen Himmelskörper untereinander wesentlich zu dieser Aufheizung beitrugen.

Von Alan E. Rubin

Die innere Wärme der Erde wird im Wesentlichen von vier radioaktiven Isotopen langer Lebensdauer erzeugt: Kalium-40, Thorium-232, Uran-235 und Uran-238. Während ihres langsamen Zerfalls geben diese Stoffe über Jahrmilliarden hinweg Energie ab. Die Größe der Erde – ihr Durchmesser beträgt 12740 Kilometer – sorgt dafür, dass die Wärme nur langsam verloren geht. Deshalb verfügt unser Planet über einen geschmolzenen äußeren Kern und über aktive Vulkane auf seiner Oberfläche.

Für kleinere Himmelskörper ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und somit die Energieabstrahlung ins Weltall größer. Der Erdmond beispielsweise – mit knapp 3500 Kilometer Durchmesser nur rund ein Viertel so groß wie unser Heimatplanet – verliert deshalb seine Wärme viel schneller. Schon vor drei Milliarden Jahren endete auf dem Mond der Auswurf von Basalt, dem häufigsten vulkanischen Gestein.

Die Kleinplaneten, auch Planetoiden oder Asteroiden genannt, von denen die meisten in einer gürtelförmigen Region zwischen Mars und Jupiter durch das Sonnensystem schwirren und ebenfalls aus Gestein bestehen, verlieren ihre Wärme noch schneller. Vesta, mit 516 Kilometer Durchmesser der drittgrößte Planetoid, hat ein 25-mal so großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis wie die Erde. Dennoch muss Vesta früher geologisch aktiv gewesen sein. Spektroskopische Analysen ergaben nämlich, dass offenbar vulkanischer Basalt die Oberfläche des Kleinplaneten bedeckt. Demnach muss das Innere Vestas einst schmelzflüssig gewesen sein. Freilich kommen Radioisotope als Ursache der Aufheizung nicht in Frage: Ausgehend von der ursprünglichen Häufigkeit der Isotope und dem zu erwartenden Wärmeverlust zeigen Berechnungen, dass Zerfallswärme weder das Innere Vestas noch ▷



Durch Einschläge heizt sich ein Kleinplanet insgesamt nur wenig auf. Doch wegen seines hochporösen Aufbaus wird das Gestein lokal stark erhitzt und umgewandelt.

▷ irgendeines anderen Planetoiden aufschmelzen konnte. Es muss darum noch einen anderen Mechanismus für die Aufheizung gegeben haben – aber welchen?

Nachdem die Planetenforscher jahrzehntelang darüber rätselten, sind sie in den letzten Jahren mit Hilfe von Raumsonden, insbesondere der Mission »Near Earth Asteroid Rendezvous« (Near), auf eine mögliche Antwort gestoßen. Messungen der Anziehungskraft während des Vorbeiflugs von Near am Planetoiden Mathilde im Jahr 1997 haben gezeigt, dass Masse und Dichte des Himmelskörpers geringer sind als erwartet. Die logische Schlussfolgerung: Mathilde ist offenbar ein hochporöser Geröllhaufen mit zahlreichen Spalten und Hohlräumen.

Dieser Befund hat die Annahmen der Wissenschaftler über die Dynamik der Planetoiden in Frage gestellt und die Möglichkeit aufgeworfen, Kollisionen der Felsbrocken untereinander könnten große Mengen an Wärme erzeugt haben (obwohl Mathilde selbst wohl niemals geschmolzen war). Die Hypothese ist noch umstritten, wird aber von neueren Untersuchungen an Meteoriten, die zumeist von Planetoiden stammen, gestützt. Und sie würde nicht nur ein altes Rätsel der Astronomie lösen, sondern einen neuen Blick auf die Frühgeschichte des Sonnensystems werfen.

Klassifikation anhand spektroskopischer Merkmale

Eines der wichtigsten Werkzeuge zur Untersuchung von Kleinplaneten ist die Spektroskopie: Die Astronomen vergleichen das Spektrum des von den felsigen Himmelskörpern reflektierten Sonnenlichts mit dem Reflektionsspektrum von Gestein im Labor. Unterschiedliche Minerale absorbieren und reflektieren Licht bei verschiedenen Wellenlängen. Basalt beispielsweise absorbiert sehr stark Licht knapp jenseits des roten Endes des sichtbaren Spektrums.

Je nach spektroskopischer Signatur werden die Planetoiden in verschiedene Klassen eingeteilt. Den inneren Bereich des Hauptgürtels dominieren jene der S-Klasse. Diese Gruppe enthält vermutlich sowohl Himmelskörper, die einst schmelzflüssig waren, als auch solche, die stets fest blieben. Im äußeren Teil des Hauptgürtels – mehr als 450 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt – dominieren hingegen Planetoiden der C-, P- und D-Klasse. Diese scheinen durchweg primitive Himmelskörper zu sein, die niemals schmelzflüssig waren. Ein großer Nachteil der spektroskopischen Fernerkundung ist, dass sie nur Informationen über die oberste Schicht der Oberfläche liefert. Möglicherweise aber ist diese äußere Staubschicht in manchen Fällen nicht repräsentativ für die darunter verborgene Kruste.



Gewogen und als zu leicht befunden: Planetoiden ähneln eher lockeren Schutthaufen als einem festen Gesteinsbrocken

Eine Alternative ist die direkte Untersuchung von Meteoriten. Durch Einschläge von ihrem Mutterkörper abgetrennt und in den interplanetaren Raum katapultiert, sind diese Brocken auf eine Umlaufbahn um die Sonne geraten, die sie auf Kollisionskurs mit der Erde brachten. (Die große Mehrheit der vielen zehntausend Meteoriten in den Sammlungen der Forschungsinstitute stammt aus dem Asteroidengürtel. Nur etwa 60 bis 70 Exemplare kommen vermutlich vom Mond oder vom Mars.)

Die häufigsten Steinmeteorite sind die Chondrite, die sich in der Regel durch eine Vielzahl kugelförmiger Einschlüsse, der so genannten Chondren auszeichnen (siehe Kasten auf S. 65). Diese Kügelchen von rund einem Millimeter Durchmesser bestehen hauptsächlich aus Silikaten. Sie sind vor 4,6 Milliarden Jahren im solaren Urnebel entstanden, in jener Gas- und Staubwolke, aus der sich unser Sonnensystem entwickelte. Als sich die ersten felsigen Körper im Urnebel bildeten, wurden die Chondren in diese eingelagert.

Klar ist, dass die Chondrite nach Entstehung ihrer Mutterkörper niemals geschmolzen sein können – denn das hätte die Chondren zerstört. Allerdings zeigen viele Chondrite Anzeichen einer Aufheizung auf Temperaturen unterhalb des Werts, bei dem die Chondren zu schmelzen beginnen. Die Wissenschaftler unterscheiden sechs petrologische Typen von Chondriten, je nach Umfang, in dem thermische Einflüsse oder Wasser die Meteorite seit ihrer Entstehung verändert haben. Die ursprünglichsten Chondrite sind jene des Typs 3; ihre Mineralkörner zeigen keinerlei Spuren einer Rekristallisation als Folge einer Erhitzung. Diese Gesteinsbrocken enthalten außerdem flüchtige Substanzen wie Edelgase und Wasser in moderater Konzentration sowie zahlreiche winzige präsolare Körnchen – Staubpartikel, die vor langer Zeit in den Atmosphären anderer Sterne entstanden und sich seither nicht verändert haben. Anhand dieser Indizien lässt sich folgern, dass Chondrite vom Typ 3 niemals über 400 bis 600 Grad Celsius erhitzt wurden.

Allerdings waren viele Chondrite dieses Typs auf ihrem Ursprungsplanetoiden der Einwirkung von Wasser ausgesetzt. Entweder ist bei einer Erhitzung des Gesteins Wassereis geschmolzen oder die Feuchtigkeit stammte aus wasserhaltigen Silikaten, die bei Temperaturen von einigen hundert Grad Celsius dehydrieren. Chondrite der Typen 1 und 2 unterscheiden sich vom Typ 3 vor allem dadurch, dass sie stärker durch den Einfluss von Wasser verändert wurden. In ihnen ist ein großer Teil des Eisens und des Nickels oxidiert. Der Gewichtsanteil von Wasser beträgt für Chondrite des Typs 1 etwa elf Prozent, für Typ 2 rund neun und für Typ 3 bis zu zwei Prozent.

Chondrite der Typen 4, 5 und 6 zeigen in dieser Reihenfolge eine immer stärkere thermische Metamorphose. Eine

IN KÜRZE

▶ Trotz ihrer **geringen Größe** waren Planetoiden in der Frühzeit des Sonnensystems offenbar hohen Temperaturen ausgesetzt.

▶ Lange dachten die Astronomen, der radioaktive Zerfall von Aluminium-26 sei die **Ursache für die Aufheizung** der Planetoiden gewesen. Neue Berechnungen weisen jedoch darauf hin, dass diese Erklärung nicht ausreicht.

▶ **Kollisionen** zwischen porösen Planetoiden könnten die fehlende Hitze geliefert haben. Meteoriten zeigen Spuren hochenergetischer Einschläge, die viele Planetoiden unmittelbar nach ihrer Entstehung aufgeheizt haben könnten.

umfangreiche Rekristallisation hat dazu geführt, dass die Chondren und die ihnen benachbarten Mineralkörner in der Matrix – also in dem Material, in dem die Chondren eingebettet sind – gröber wurden und sich gegenseitig beeinflusst haben. Außerdem hat die Aufheizung die meisten der präsolaren Körner zerstört und die Anteile von Edelgasen und Wasser in dem Gestein erheblich reduziert. Diese Chondrite wurden offenbar auf Temperaturen von 600 bis 950 Grad Celsius aufgeheizt.

Suche nach der Wärmequelle

Andere Klassen von Meteoriten zeigen sogar Anzeichen dafür, dass sie einst schmelzflüssig waren. Wenn ein chondritischer Planetoid komplett aufschmilzt, vermischen sich metallische und silikatische Phasen nicht: Sie scheiden sich – wie Öl und Wasser – gemäß ihrer Dichte voneinander. Das dichtere flüssige Eisen sinkt in den Kern des Planetoiden, wo es beim Abkühlen langsam auskristallisiert. Die Silikate härten oberhalb des Kerns zu einem Gesteinsmantel aus. Ein teilweises Schmelzen dieses Mantels kann zur Bildung von Basalten führen, die zur Oberfläche aufsteigen und sich dort zu einer Kruste verfestigen. Die Forscher nennen das Ergebnis dieses Vorgangs einen differenzierten Körper.

Viele Meteorite scheinen von solchen Planetoiden zu stammen. Die meisten Eisenmeteorite – die größten und schwersten extraterrestrischen Körper, die auf der Erde gefunden wurden – sind Bruchstücke aus den Kernen aufgeschmolzener Planetoiden. Viele der Steineisenmeteorite entstammen offenbar der Grenzschicht zwischen Kern und Mantel. Eine andere Sorte von Meteoriten, die Eukrite, wurden vermutlich aus der Kruste herausgerissen.

Über 90 Prozent aller von Planetoiden stammenden Meteorite, deren Fall beobachtet wurde, scheinen einst geschmolzen gewesen zu sein (zum Beispiel Eisen- und Steineisenmeteorite und Eukrite), oder zeigen zumindest Hinweise auf eine signifikante Metamorphose durch Erhitzen (Chondrite der Typen 4, 5 und 6). Es ist deshalb klar, dass viele Planetoiden einst ziemlich heiß gewesen sein müssen. Doch welcher Mechanismus vermochte die Kleinplaneten so stark zu erhitzen, wo sie doch zu klein waren, um durch Zerfallswärme langlebiger Radioisotope erwärmt zu werden? ▷

Planetoiden – Relikte aus dem Ur-Sonnensystem

Die Kleinplaneten entstanden vor 4,5 Milliarden Jahren, als sich im solaren Urnebel die ersten Gesteinsbrocken zu größeren Körpern zusammenklumpten. 1997 passierte die Sonde »Near Earth Asteroid Rendezvous« (Near) den Planetoiden Mathilde (rechts). Ihre Messungen deuten darauf hin, dass der Planetoid eine Art poröser Geröllhaufen ist, der durch gewaltige Einschläge verformt wurde. Im Jahr 2000 schwenkte Near in eine Umlaufbahn um Eros (unten) ein, einen kleineren, dichteren, mit Kratern übersäten Planetoiden.

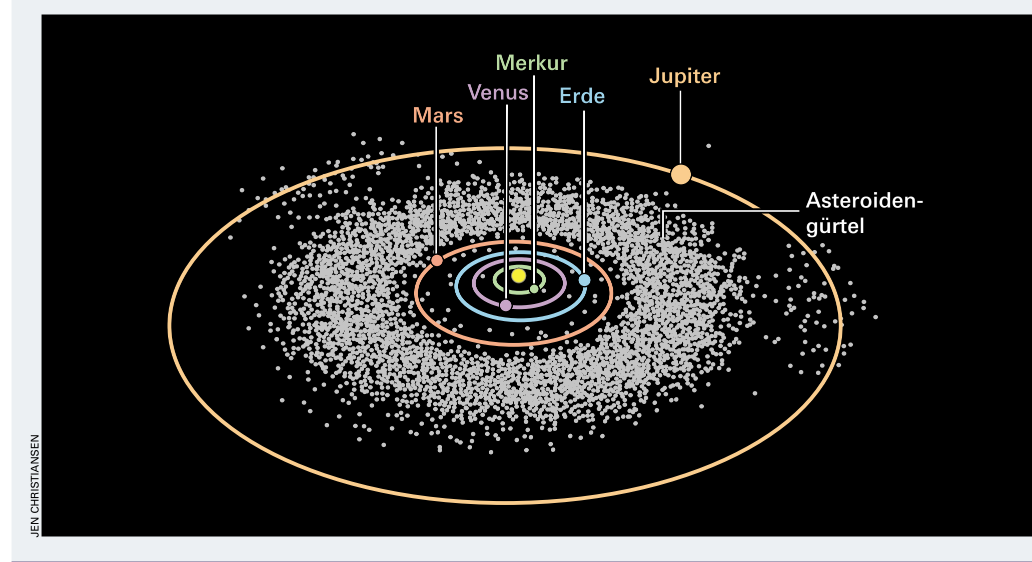


NASA / NSSDC



NASA / NSSDC

Die meisten Planetoiden, so auch Mathilde, umkreisen die Sonne auf Bahnen, die zwischen denen von Mars und Jupiter liegen. (Eros hingegen befindet sich auf einer näher an der Erde gelegenen Bahn.) In dem Diagramm sieht der Asteroidengürtel zwar dicht bevölkert aus, tatsächlich sind die größeren Planetoiden aber Millionen von Kilometern voneinander entfernt.



JEN CHRISTIANSEN

▷ Vor 50 Jahren schlug der Chemie-Nobelpreisträger Harold Urey eine mögliche Lösung für dieses Problem vor: Das Isotop Aluminium-26 (^{26}Al) könnte, so seine Idee, die Planetoiden aufgeheizt haben. Im Gegensatz zum gewöhnlichen Aluminium-27 (^{27}Al), das ein Neutron mehr besitzt, ist ^{26}Al nicht stabil: Es zerfällt in Magnesium-26 (^{26}Mg) und setzt dabei Energie frei. Die Halbwertszeit von ^{26}Al ist mit 730 000 Jahren um mehrere Größenordnungen kleiner als diejenige langlebiger Radioisotope. Deshalb könnten schon geringe Anteile von ^{26}Al die Temperatur eines kleinen Himmelskörpers drastisch erhöhen. Allerdings hält die Aufheizung nicht lange an – innerhalb weniger Millionen Jahre ist fast der gesamte Vorrat an ^{26}Al zerfallen.

Manche Wissenschaftler meinen, dass das ^{26}Al in unserem Sonnensystem einst durch Kernreaktionen in einem anderen Stern entstanden ist, dann durch die Supernova-Explosion dieses Sterns ins All geschleudert wurde und schließlich vor 4,6 Milliarden Jahren in die präsolare Gaswolke gelangte. Einige Forscher halten es sogar für möglich, dass die Stoßwelle dieser Explosion den Kollaps der Gaswolke und damit die Entstehung unserer Sonne und ihrer Planeten erst ausgelöst hat. Ein solcher Prozess könnte ^{26}Al gleichmäßig über die gesamte Gaswolke verteilt und so eine Wärmequelle für felsige Himmelskörper bereitgestellt haben, die sich weiträumig um die Sonne herum bildeten. Wenn die Menge an ^{26}Al groß genug war, könnten einige Planetoiden gleich nach ihrer Entstehung sogar komplett schmelzflüssig gewesen sein.

Diejenigen Kleinplaneten, die sich erst später bildeten, hätten weniger ^{26}Al enthalten. Die Aufheizung durch das Isotop hätte dann zu einer Zwiebelschalenstruktur der Himmelskörper geführt. Da ihr Inneres langsamer abgekühlt wäre als ihr Äußeres, wäre das Gestein in ihrem Kern am stärksten thermisch verändert (und beispielsweise zu Chondriten des Typs 6 geworden). Diese Metamorphose würde in konzentrischen Schalen um den Kern nach außen hin abnehmen (Chondrite des Typs 5, 4 und 3).

Um diese Hypothese zu überprüfen, haben die Forscher nach einem ungewöhnlich hohen Anteil an ^{26}Mg, also dem Zerfallsprodukt von ^{26}Al, in Meteoriten gesucht. Die Geochemiker richten ihr Augenmerk dabei vor allem auf einen Überschuss von ^{26}Mg in meteoritischen Mineralen, die viel Aluminium, aber wenig Magnesium enthalten. Erst kürzlich haben Forscher aluminiumreiche Minerale wie Anortit und Hibonit mit Hilfe einer Ionensonde untersucht. Dieses Gerät bombardiert die Stoffprobe mit einem fokussierten Ionenstrahl und schlägt so Sekundärionen aus der Oberfläche des Materials heraus. Die freigesetzten Ionen werden in ein Massenspektrometer geleitet, das ihre Zusammensetzung analysiert.

Diese Analysen haben starke Hinweise auf das frühere Vorhandensein von ^{26}Al in so genannten refraktären Einschlüssen geliefert. Das sind winzige kalzium- und aluminiumreiche Mineralansammlungen, die sich in Chondriten neben den Chondren eingebettet finden. Die Minerale in diesen Einschlüssen bilden sich bei Temperaturen von mindestens 1180 Grad Celsius, stammen also vermutlich aus der frühesten Zeit des Sonnensystems, als die Gaswolke noch sehr heiß war. In den untersuchten Einschlüssen betrug das Häufigkeitsverhältnis von ^{26}Al zu ^{27}Al zumeist um $4{,}5 \cdot 10^{-5}$. Diesen Wert bezeichnen die Forscher als kanonisches Verhältnis.

Mit dieser relativ hohen Konzentration könnte ^{26}Al eine substanzielle Wärmequelle gewesen sein. In den Einschlüssen der meisten Chondritengruppen stößt man auf dasselbe Verhältnis. (Zusätzlich zur Klassifizierung in unterschiedliche metamorphe Typen teilen die Forscher Chondrite nach ihrer chemischen Zusammensetzung in drei Hauptgruppen ein: gewöhnliche Chondrite, kohlige Chondrite und Enstatite.) Doch die refraktären Einschlüsse enthalten nur einen kleinen Teil des gesamten Aluminiums in den Chondriten. Viel mehr davon (zumeist 30 bis 90 Prozent) findet sich in den Chondren, die also einen weit größeren Beitrag zur radioaktiven Aufheizung geliefert haben sollten als die refraktären Einschlüsse.

Im Jahr 2000 untersuchte ein Team um die Japanerin Noriko Kita (nun an der Universität von Wisconsin in Madison) Chondren in gewöhnlichen Chondriten. Für die Zeit ihrer Entstehung fanden die Wissenschaftler ein mittleres ^{26}Al/^{27}Al-Verhältnis von nur $7{,}4 \cdot 10^{-6}$, einem Sechstel des kanonischen Werts. Aus diesem niedrigen Anfangsverhältnis und der Zerfallsrate von ^{26}Al folgt, dass die Kügelchen ein bis zwei Millionen Jahre nach den refraktären Einschlüssen entstanden sein müssen (vorausgesetzt, die radioaktiven Isotope waren im frühen Sonnensystem gleichmäßig verteilt). Da nach dem gängigen Bild die chondritischen Planetoiden später entstanden als die Chondren, liefert das Anfangsverhältnis der Aluminiumisotope in den Chondren eine Obergrenze für die Menge an ^{26}Al, die für die Aufheizung der felsigen Himmelskörper zur Verfügung stand.



Warensendung aus dem All: Meteorite liefern den Geochemikern Informationen über den inneren Aufbau der Kleinplaneten

Aluminium-26 reicht nicht aus

Es erscheint unwahrscheinlich, dass diese ^{26}Al-Menge für die in den Meteoriten beobachtete Aufheizung ausreichte. Selbst wenn sich die Planetoiden unmittelbar nach der Entstehung der Chondren gebildet hätten, könnte ^{26}Al das Innere von gewöhnlichen chondritischen Himmelskörpern auf maximal 1100 Grad Celsius aufgeheizt haben – das reicht zwar, um Metalle und Sulfide, aber nicht, um Silikate zu schmelzen. Eine Ausdifferenzierung der Planetoiden wäre demnach nicht möglich gewesen.

In den Ursprungskörpern der kohligen Chondrite war die Aufheizung durch radioaktiven Zerfall sogar noch geringer. Eine Untersuchung der Chondren in einem dieser Meteorite (von Takuya Kunihiro und mir gemeinsam mit Kollegen von der Universität von Kalifornien in Los Angeles durchgeführt) ergab ein mittleres Anfangsverhältnis von ^{26}Al zu ^{27}Al von $3{,}8 \cdot 10^{-6}$, also nur die Hälfte des Werts in gewöhnlichen chondritischen Chondren. Selbst unter großzügigen Annahmen kommt man damit für einen 80 Kilometer großen kohlig-chondritischen Planetoiden nur auf etwa 670 Grad Celsius – viel zu wenig, um irgendein Material zu schmelzen.

Wegen dieses Problems vermuten Befürworter der ^{26}Al-Aufheizung, manche Chondren seien schon früher in der Ge-

Meteoriten – ein Stück Himmel auf Erden

Wissenschaftler können die Geschichte der Planetoiden erforschen, indem sie Meteoriten untersuchen – Felsbrocken, die von ihren Ursprungsplanetoiden abgespalten, ins All geschleudert und schließlich vom Schwerefeld der Erde eingefangen wurden. Die häufigste Art sind die Chondrite, die in der Regel viele kugelförmige Einschlüsse enthalten, die so genannten Chondren. Die Forscher sägen die Meteoriten in dünne Scheiben und untersuchen unter dem Mikroskop ihre kristalline Struktur. So können sie Hinweise auf Einschläge und Aufheizungen finden.

Eine Scheibe des Colony-Meteoriten, eines 3,9 Kilogramm schweren kohligen Chondrits, der 1975 auf einer Baumwollfarm in Oklahoma gefunden wurde

SMITHSONIAN INSTITUTION



ALAN E. RUBIN

Die Mikroskopaufnahme einer Chondre im Allende-Meteoriten, der 1969 in Mexiko niederging, zeigt Anzeichen einer Aufheizung. Die konzentrischen Ringe deuten an, dass die Chondre dreimal Schmelzprozessen ausgesetzt war.

Der Kernouvé-Meteorit, ein 4,45 Milliarden Jahre alter gewöhnlicher Chondrit, fiel 1869 in Frankreich zur Erde. Ursprünglich dachten die Forscher, dieser Gesteinsbrocken sei keinen Stoßwellen ausgesetzt gewesen, da seine Silikatkörnchen nicht deformiert zu sein schienen. Doch eine genauere Inspektion zeigt Metalladern (gelb), die darauf hindeuten, dass hochenergetische Einschläge den Felsbrocken aufgeheizt haben.



ALAN E. RUBIN

schichte des Sonnensystems entstanden und hätten deshalb ein viel höheres $^{26}Al/^{27}Al$-Verhältnis besessen. Solch frühe Chondren könnte die Forschung freilich nie nachweisen, denn sie hätten die chondritischen Planetoiden, zu denen sie sich zusammenlagerten, geschmolzen und sich damit selbst zerstört.

Ganz unsinnig ist diese Hypothese zwar nicht, aber doch wenig wahrscheinlich. Wenn nämlich einst Chondren mit hohem ^{26}Al-Gehalt vorhanden waren, sollte es auch welche geben, die etwas später entstanden und einen eher mittleren ^{26}Al-Anteil haben – zu niedrig, um sich durch Aufheizen selbst zu zerstören, aber höher als die bislang gefundenen Werte. Derartige Chondren sollten also bis heute erhalten geblieben sein – doch die Forscher haben bislang keine entdeckt. (Um fair zu sein: Sie haben gerade erst angefangen, danach zu suchen.)

Da die Aufheizung durch ^{26}Al also wohl nicht ausreichte, die Planetoiden zu schmelzen, halten die Forscher nach weiteren Wärmequellen Ausschau. Eine häufig diskutierte Alternative ist Eisen-60 (^{60}Fe), dessen Halbwertszeit 1,5 Millionen Jahre beträgt. Alexander Shukolyukov und Günter Lugmair von der Universität von Kalifornien in San Diego stießen in Eukriten auf Nickel-60, das Zerfallsprodukt von ^{60}Fe. Shogo Tachibana und Gary Huss, damals an der Arizona State University tätig, fanden das Isotop in einigen Chondriten. Doch das daraus abgeleitete Anfangsverhältnis von ^{60}Fe zu dem stabilen ^{56}Fe ist mit Werten um $3 \cdot 10^{-7}$ gering. Kunihiro und seinen Koautoren zufolge hätte der Zerfall von ^{60}Fe die Temperatur der Planetoiden um höchstens 180 Grad erhöht. Die Forscher folgerten daraus, dass auch der kombinierte Zerfall von ^{26}Al und ^{60}Fe nicht ausreichte, Planetoiden zu schmelzen.

Ein weiterer Kandidat für den Aufheizungsmechanismus ist elektrische Induktion. Von der jungen Sonne könnte ein starker Strom ionisierter Teilchen mit einem darin eingebetteten Magnetfeld ausgegangen sein, der mit mehreren hundert Kilometern pro Sekunde durch das Sonnensystem fegte. Wenn dieser Sonnenwind auf leitfähige Planetoiden traf, könnte er in ihnen elektrische Ströme induziert haben, die wiederum Wärme erzeugten. Allerdings unterstützen nur wenige Forscher diese Idee, da sie mit vielen Unwägbarkeiten verknüpft ist. So ist ungewiss, ob die junge Sonne jemals einen so starken Wind erzeugt hat. Und wenn, dann wäre er vermutlich von ihren Polen weggeströmt – also fernab vom Aufenthaltsort der Planetoiden in der äquatorialen Akkretionsscheibe.

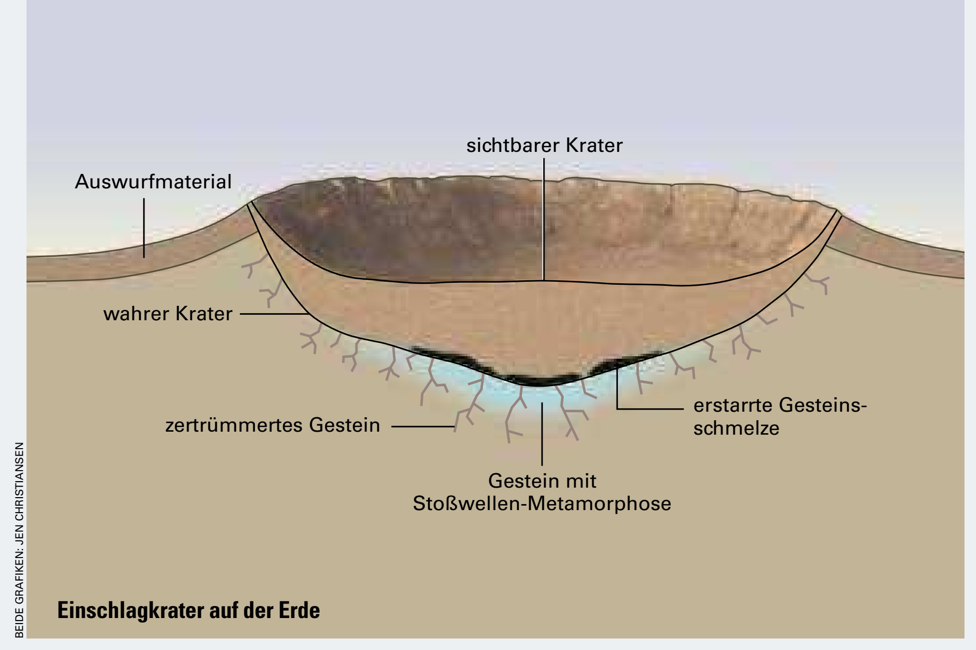
Kollisionen – das Für und Wider

Es bleibt nur eine realistische Alternative: Die Hitze wurde durch Zusammenstöße von Planetoiden erzeugt. Aber auch diese Hypothese hat ihre Probleme.

Der Geowissenschaftler Klaus Keil vom Institut für Geophysik und Planetologie der Universität von Hawaii und seine Koautoren haben eine ganze Reihe von Gegenargumenten vorgebracht. Erstens könne ein einzelner Einschlag die globale Temperatur eines planetoidengroßen Himmelskörpers nur um wenige Grad erhöhen. Zweitens sei das Oberflächen-Volumen-Verhältnis für Kleinplaneten so groß, dass sie ihre Wärme rasch abstrahlen und folglich zwischen aufeinander folgenden Einschlägen rasch abkühlen würden. Drittens erzeuge ein typischer Einschlag im Vergleich zum zertrümmerten Material nur geringe ▷

Warum gleichartige Einschläge unterschiedliche Eindrücke hinterlassen

Wenn ein Objekt auf einen festen Himmelskörper wie die Erde prallt, erzeugt es einen schüsselförmigen Krater und schleudert große Trümmermengen heraus (rechts). Ein Teil des Auswurfmaterials setzt sich in der Einschlagstelle ab. Der so entstehende sichtbare Krater ist nur noch halb so tief wie der ursprüngliche Einschlag. Ein anderer Teil der Trümmer lagert sich außerhalb des Kraterrands ab. Wenn jedoch ein Objekt einen Planetoiden mit geringer Dichte trifft, bohrt es sich durch das poröse Material wie eine Gewehrkugel durch Styropor (ganz rechts). Die Energie des Einschlags erzeugt Hitze und komprimiert die Materie lokal, anstatt sie herauszuschleudern. Die Trümmer des Einschlags fallen in die Vertiefung zurück und wirken wie eine Decke, welche die Wärme zurückhält.



BEIDE GRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN

Mengen an geschmolzenem Gestein. Und viertens: Die geringe Entweichgeschwindigkeit erlaube es gerade dem am meisten aufgeheizten Material, in den interplanetaren Raum zu entkommen.

All dies mögen gewichtige Einwände sein – trotzdem sind sie möglicherweise irrelevant. Denn ihre gemeinsame Annahme ist, dass Planetoiden aus fest zusammengefügtem Material geringer Porosität bestehen – wie die Erde und ihr Mond. Die ungewöhnlich geringe Dichte vieler Kleinplaneten – teilweise nur 1,2 Gramm pro Kubikzentimeter – weist aber darauf hin, dass es sich um lockere Geröllhaufen handelt. Für den Planetoiden Mathilde beispielsweise errechnet sich aus der Dichte eine Porosität von 50 Prozent. Demnach ist die Hälfte des Planetoidenvolumens leerer Raum. Unmittelbar nach ihrer Entstehung aus den Trümmern des frühen Sonnensystems könnte die Porosität der Planetoiden sogar noch größer gewesen sein. Die Akkretion kleinerer Himmelskörper zu größeren erfolgt nämlich bei sehr niedrigen Relativgeschwindigkeiten und erzeugt flockige Strukturen. Energiereiche Einschläge sind nötig, um diese porösen Gebilde zu festen Körpern zu verdichten.

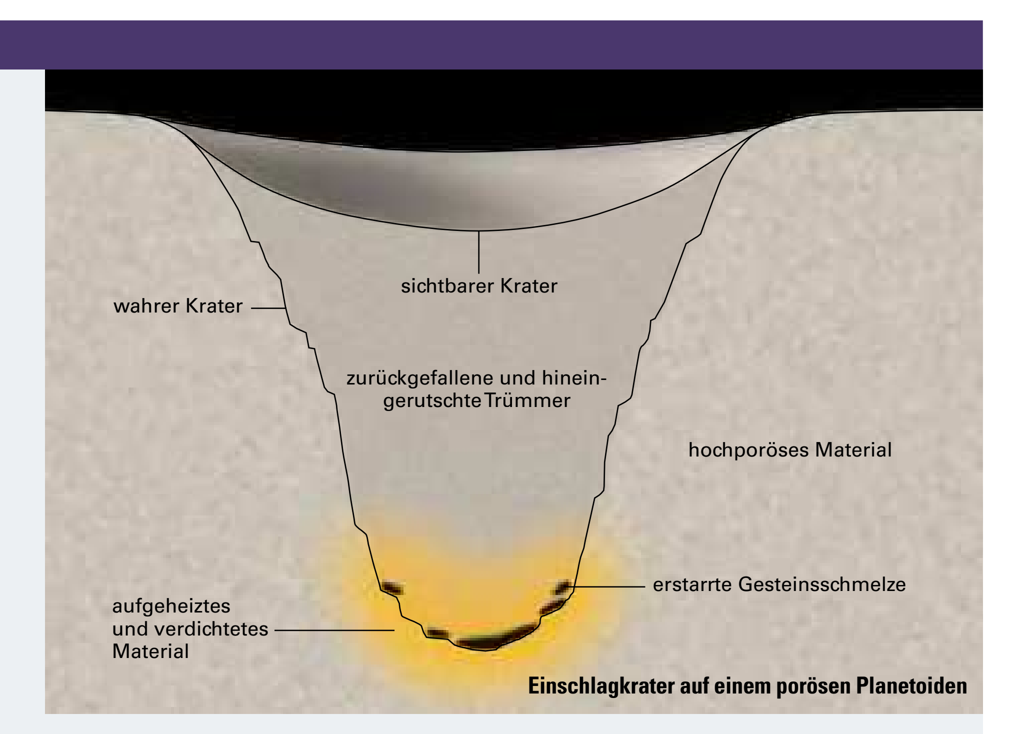
Wenn auf der Erde ein großer Meteorit einschlägt, entsteht ein flacher Krater. Auf einem Planetoiden mit geringer Dichte erzeugt er hingegen einen tiefen, fast zylindrischen Schacht in dem porösen Körper (siehe Kasten oben). Da die Stoßenergie in porösem Material sehr schnell gedämpft wird, verbleibt sie zum Großteil in einer relativen dünnen Schicht entlang der Kraterwandung und heizt diese sehr effektiv auf. Verglichen mit einem Einschlag in einen fester gebundenen Körper wird mehr Energie in Wärme umgewandelt und weniger in kinetische Energie von Auswurfmaterial. Stattdessen fallen viele Trümmer in die Vertiefung zurück, füllen den Krater und wirken wie eine Decke, unter der sich die Wärme länger halten kann. Wenngleich also die globale Temperatur des Planetoiden kaum ansteigt, können Teilbereiche erheblich aufgeheizt werden – manche Gesteine würden sogar schmelzen. Durch aufeinander folgende Einschläge entstünden jeweils in der Umgebung der Krater Bereiche mit metamorphem Gestein.



Stoßwellen und thermische Veränderungen: Die innere Struktur von gewöhnlichen Chondriten bestätigt die Kollisionstheorie

Neuere Untersuchungen an Meteoriten liefern weitere Hinweise auf eine Aufheizung durch Kollisionen. Gewöhnlich untersuchen Forscher, ob ein Meteorit Stoßwelleneffekte aufweist – also einen heftigen Einschlag erlebt hat –, indem sie sich die Struktur seiner Silikatkörnchen ansehen. Starke Stoßwellen verformen die Kristallstruktur und erzeugen ein mosaikartiges Muster, das sich leicht unter dem Mikroskop erkennen lässt. (Die Kollision, die den Meteoriten aus seinem Mutterkörper herausgerissen hat, ist zumeist nicht die Ursache des Stoßwelleneffekts. Die herausgerissenen Trümmer werden in ihrer Kristallstruktur nicht nennenswert deformiert.)

Kürzlich habe ich 200 metamorphe gewöhnliche Chondrite untersucht, die nach ihrer ursprünglichen Klassifizierung keine oder nur geringe Stoßwelleneffekte zeigen sollten, da ihre Silikatkörnchen nicht deformiert zu sein schienen. Doch ich stieß in jedem dieser Meteorite auf andere für Stoßwellen typische Merkmale wie zum Beispiel Metalladern. (Da Metalle einen niedrigeren Schmelzpunkt aufweisen als Silikate, verflüssigen sie sich oft nach einem Einschlag und bilden dann Adern im Gestein.) Ich folgerte daraus, dass alle metamorphen gewöhnlichen Chondrite einer Stoßwelle ausgesetzt waren und in deren Folge auf-



Einschlagkrater auf einem porösen Planetoiden

geheizt wurden, einige sogar mehrfach. Die Stoßwelleneffekte sind leicht zu übersehen, da einige von ihnen durch das Aufheizen und den daraus resultierenden Spannungsabbau in den verformten Silikatkörnern ausgelöscht wurden.

Tief unter die Haut

Ein gewöhnlicher Chondrit, den ein Team um Eleanor Dixon vom Johnson-Raumfahrtzentrum der Nasa anhand seiner Isotopenzusammensetzung datierte, muss vor 4,27 Milliarden Jahren einer Stoßwelle und einer nachfolgenden Aufheizung ausgesetzt gewesen sein. Kurzlebige Radioisotope kamen nicht als Quelle der Aufheizung in Frage, da das Ereignis 300 Millionen Jahre – oder 400 Halbwertszeiten von ^{26}Al – nach der Entstehung der Planetoiden stattfand.

Wenn Einschläge so spät in der Geschichte des Sonnensystems einen Planetoiden aufheizen konnten, dann musste das auch zu früheren Zeiten möglich gewesen sein, in denen Kollisionen weit häufiger waren. Tatsächlich bin ich auf einige hochgradig metamorphe gewöhnliche Chondrite gestoßen, die ein solches Szenario unterstützen: Sie sind etwa 4,45 Milliarden Jahre alt und weisen deutliche Stoßwelleneffekte auf, wie zum Beispiel Ansammlungen von geschmolzenem Metall und Schwefel in direkter Nachbarschaft zu Silikaten, die offenbar aufgeheizt wurden.

Die Hypothese, der zufolge Einschläge einen wesentlichen Beitrag zur Aufheizung der Planetoiden lieferten, lässt sich weiter prüfen, indem man nach einer positiven Korrelation zwischen dem Metamorphosegrad von Chondriten und der Stärke der Stoßwelleneffekte sucht. Je stärker die Stoßwelle, die den Gesteinsbrocken erschütterte, desto stärker sollte er nämlich aufgeheizt worden sein. Die Daten von über 1650 gewöhnlichen Chondriten, die ich dem »Catalogue of meteorites« entnahm, zeigen, dass genau das der Fall ist. Das Modell der Kollisionsheizung sagt außerdem voraus, dass die Chondritengruppen mit dem größten Anteil an metamorphen Meteoriten zugleich den größten Anteil an Meteoriten mit Stoßwelleneffekten enthalten sollten. Auch dies trifft für die Gruppen der gewöhnlichen sowie der kohligen Chondrite zu.

Zusammengefasst erlaubt eine faire Bewertung der Indizien den Schluss, dass sowohl Kollisionen als auch ^{26}Al maßgeblich zur Aufheizung der Planetoiden beigetragen haben. Meiner Ansicht nach waren die Kollisionen der dominante Mechanismus – aber viele Kosmochemiker setzen immer noch ausschließlich auf ^{26}Al. Wenn die Aufheizung durch Kollisionen dominierte, dann steht die thermische Geschichte der Planetoiden im Widerspruch zu derjenigen, die aus dem Standard-Zwiebelschalenmodell des Planetoidenaufbaus folgt. Beispielsweise wäre die Abkühlzeit für Gestein unter dem Boden von Einschlagkratern erheblich kürzer als die Jahrmillionen, die für die durch ^{26}Al-Zerfall aufgeheizten inneren Gesteinsschichten veranschlagt werden. Ed Scott von der Universität von Hawaii in Manoa hat kürzlich die Daten über die Abkühlzeiten einer Untergruppe der gewöhnlichen Chondrite ausgewertet und erkannt, dass sie überwiegend gegen eine geschichtete Struktur des Ursprungskörpers sprechen, wie sie bei einer Aufheizung durch ^{26}Al zu erwarten wäre.

Planetoiden, Planeten und Kometen haben einen gemeinsamen Ursprung. Die Körper im Asteroidengürtel hätten sich ebenfalls zu einem Planeten zusammengelagert, wenn Jupiters störende Schwerkraft sie nicht daran gehindert hätte. Sie bieten deshalb einen Einblick in die Entwicklungsgeschichte unserer Erde vor 4,5 Milliarden Jahren. Die vor Urzeiten verkraterten Oberflächen dieser Felsbrocken zeigen, dass gewaltige Einschläge viele hundert Millionen Jahre lang an der Tagesordnung waren. Die lange diskutierte, aber nun bestätigte Erkenntnis, dass Kollisionen unter den Planetoiden zumindest teilweise für deren Aufheizung verantwortlich waren, zeigt einmal mehr, dass solche Einschläge tief unter die Haut dieser Himmelskörper gehen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Alan E. Rubin ist Geochemiker an der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Er forscht hauptsächlich über den Einfluss von Stoßwellen auf Meteoriten und die Entstehung von Chondren. 1982 promovierte er in Geologie an der Universität von Neumexiko in Albuquerque. Der Planetoid 6227 »Alanrubin« wurde 2002 nach ihm benannt. Im gleichen Jahr erschien bei Princeton University Press sein Fachbuch »Disturbing the solar system: impacts, close encounters and coming attractions«.

Kometen und Asteroiden. Sterne und Weltraum Special 2/2003

Treatise on geochemistry. Vol. 1: Meteorites, comets, and planets. Von Andrew M. Davis (Hg.). Elsevier, 2003

Asteroids III. Von W. F. Bottke et al. University of Arizona Press, 2002

Meteorites and their parent planets. Von Harry Y. McSween jr. Zweite Aufl., Cambridge University Press, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das immunologische Frühwarnsystem

Als vorderste Verteidigungslinie unseres Körpers stellt sich eindringenden Mikroben eine angeborene Form der Abwehr entgegen, die auch bei entzündlichen Erkrankungen eine Rolle spielt. Aus den überraschenden Erkenntnissen zu ihrer Funktionsweise könnten neue Therapien nicht nur für Infektionskrankheiten erwachsen.

Von Luke A. J. O'Neill

Ein kräftiger Nieser aus der einen Ecke, ein Räuspern und Hüsteln aus der anderen. Ausweichen unmöglich, der Aufzug ist bis zum letzten Platz gefüllt. Was mag man sich da bloß einfangen? Noch während man darüber grübelt, tritt das körpereigene Verteidigungssystem in Aktion. Handelt es sich um einen bekannten Erreger, wird eine Eingreiftruppe darauf geschulter Immunzellen – Spezialisten der so genannten adaptiven Abwehr – den Eindringling wiedererkennen und ihn innerhalb von Stunden außer Gefecht setzen.

Bei einem unbekannten Bakterium oder Virus kann ein anderer Arm der Abwehr erste Rettung sein. Dieses »angeborene« Immunsystem erkennt typische Klassen von Molekülen, die von einer Vielzahl krank machender Keime produziert werden. Bei Kontakt damit löst es eine Entzündungsreaktion aus, bei der bestimmte Abwehrzellen versuchen, den Erreger einzudämmen und an seiner Ausbreitung zu hindern. Die Aktivität dieser Zellen – vor allem der abgegebene chemische Cocktail – verursacht eine Rötung und Schwellung am Ort der Attacke. Sie ist auch für Fieber, Gliederschmerzen und andere grippeähnliche Symptome verantwortlich, mit denen viele Infektionen einhergehen.

Wir wissen heute, dass die Signale zum entzündlichen Angriff über verschiedene Rezeptoren vermittelt werden. Besondere Furore gemacht hat eine uralte Familie von Sensoren, die nach dem englischen *Toll-like receptors* unter dem Kürzel TLRs geführt wird. Diese Proteine erfüllen ihre Aufgabe, vom urtümlichen Pfeilschwanzkrebs bis zum Menschen. Versagen sie, dann steht Erregern Tür und Tor offen. Tun sie jedoch zu viel, können sie Krankheiten auslösen, die durch chronische Entzündungen gekennzeichnet sind. Dazu zählen beispielsweise neben Autoimmunleiden wie rheumatoider Arthritis und Lupus erythematodes sogar Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

IN KÜRZE

▶ Die angeborene Immunität, als ein Teil der körpereigenen Abwehr, sorgt dafür, Erreger rasch als Gefahr zu erkennen und zu eliminieren. Wichtig sind hierfür **molekulare Wächter** aus der Familie der so genannten Toll-artigen Rezeptoren (TLRs), die von vielen Abwehrzellen gebildet werden.

▶ Detektieren solche Rezeptoren einen Eindringling, lösen sie die Produktion verschiedener Signalproteine aus. Diese rufen **Entzündungsreaktionen** hervor und veranlassen den Körper zu einer umfassenden Immunantwort.

▶ Ohne ausreichende Wächterdienste versagt das Immunsystem; **übereifrige Wächter schaden** ebenfalls, können beispielsweise rheumatoide Arthritis oder sogar Herz-Kreislauf-Erkrankungen fördern.

▶ Wie sich die Rezeptoren oder die Proteine, mit denen sie interagieren, manipulieren ließen, versuchen Forscher nun herauszufinden. Sie erhoffen sich davon neue Möglichkeiten in der **Behandlung von Infektionen und Entzündungen**.

Im Goldrausch

Die Entdeckung dieser Rezeptoren löste unter Immunologen eine Begeisterungswelle aus. Sie waren auf weites Neuland gestoßen. Inzwischen haben viele Forscher ihre Segel dorthin gehisst, wo sie sich Erklärungen für vieles noch Rätselhafte versprechen, was Immunität, Infektion oder Abwehrfehler anbelangt. Die Untersuchungen, die sich mit den Rezeptoren und den molekularen Ereignissen nach einem Erregerkontakt befassen, liefern bereits erste Angriffspunkte für Pharmaka, mit denen sich möglicherweise die Abwehrkräfte steigern, Impfstoffe verbessern und eine Reihe von verheerenden Krankheiten behandeln lassen.

Noch vor etwa fünf Jahren aber stahl der adaptive Teil des Immunsystems dem angeborenen die Show (siehe Kasten S. 70). Lehrbücher quollen über von Einzelheiten zu seinen beiden Hauptstreitern: Sie erläuterten, wie so genannte B-Zellen Antikörper bilden, die an bestimmte äußere Proteinstrukturen von eindringen-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Keime überall, auch im Aufzug: Einem Erreger stellt sich der scheinbar primitive Teil unseres Immunsystems als Erstes entgegen – und agiert viel ausgeklügelter als je vermutet.

den Erregern andocken, und wie T-Zellen mit ihrem Oberflächenrezeptor Proteinschnipsel erkennen, die ihnen von Zuarbeitern präsentiert werden. Adaptiv heißt diese Form der Immunantwort, weil sie sich im Zuge des Infektionsgeschehens an den aktuell zu bekämpfenden Mikroorganismus anpasst. Diese optimierende Feinabstimmung braucht aber Zeit.

Die adaptive Abwehr stand noch aus einem anderen Grund im Rampenlicht: Sie verleiht dem Immunsystem ein Gedächtnis. Nach einer erfolgreich bekämpften Infektion verbleiben B- und T-Zellen, die sich dabei bewährt haben, in der Reserve. Der Körper kann sich dann einer neuerlichen Infektion mit dem gleichen Erreger schneller und wirkungsvoller erwehren. Auf dieser Fähigkeit, sich an frühere Infektionen zu erinnern, basieren auch Schutzimpfungen gegen Viren und Bakterien. Vakzine enthalten beispielsweise nur eine abgeschwächte Form des Erregers oder Teilstücke von ihm. Die Abwehr startet jedoch einen regelrechten Angriff und bildet schließlich schützende Gedächtniszellen.

Daran gemessen erschien das angeborene Immunsystem eher öde. Zu seinen Komponenten gehören antibakterielle Enzyme im Speichel und in anderen Sekreten sowie ein Satz kooperierender Proteine (fachlich bekannt unter dem Sammelbegriff Komplement), die Bakterien im Blutstrom abtöten. Das Ganze mutete weniger ausgeklügelt an als die zielgerichteten Antikörper und T-Zellen »mit der Lizenz zu töten«, zumal das angeborene Immunsystem seine Reaktionen auch nicht so maßgeschneidert an einen Erreger anpasst wie das adaptive Pendant.

Das Aschenputtel der Abwehr

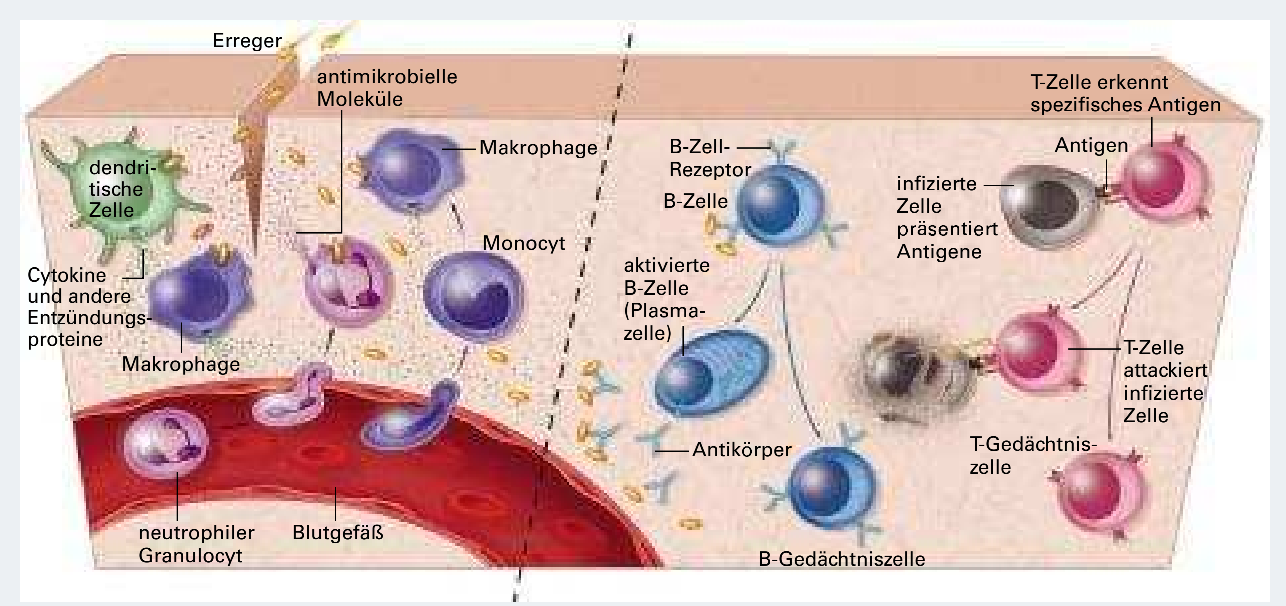
Mit ihrer Einschätzung »primitiv und uninteressant« drückten sich Immunologen klammheimlich vor einem kleinen, unangenehmen Problem: Das adaptive System funktioniert nicht ohne die vermeintlich ordinärere Schwester. Die produziert bestimmte Signalproteine, die nicht nur Entzündungsreaktionen induzieren, sondern auch die für die adaptive Immunreaktion benötigten B-und T-Zellen aktivieren. Ohne das Aschenputtel kann die noble Schwester nicht glänzen.

In den späten 1990er Jahren war ungeheuer viel über die Funktionsweise des adaptiven Arms bekannt, relativ wenig aber über die des angeborenen Immunsystems. Wie wurde es durch Mikroben aktiviert und wie trug diese Stimulation dann im Einzelnen dazu bei, den T- und B-Zellen eine adaptive Immunantwort zu entlocken? Des Rätsels Lösung verbarg sich, wie bald darauf die Fachwelt erfahren sollte, großenteils in den TLRs, die von verschiedenen Zellen des Immunsystems gebildet werden. Der Weg dorthin war allerdings reichlich verschlungen.

Im Grunde fiel der Startschuss in den frühen 1980er Jahren, als Forscher ▷

Doppelt gesichert

Das Immunsystem von Säugetieren, und damit auch des Menschen, besteht aus zwei ineinander greifenden Abteilungen. Die eine sorgt für die angeborene Immunität (links), die andere für die erworbene (rechts). Dicht an den Eintrittspforten des Körpers agiert die allzeit bereite angeborene Abwehr. Gelingt es ihr nicht, die Ausbreitung eines Erregers zu verhindern, startet das lernfähige adaptive System einen späteren, dafür hochgradig gezielten Angriff gegen den jeweiligen Keim.



Das angeborene Immunsystem
Es umfasst unter anderem antimikrobielle Moleküle und verschiedene Fresszellen, die Erreger verschlingen und zerstören. Dazu zählen dendritische Zellen und Makrophagen im Gewebe. Fresszellen lösen auch eine Entzündungsreaktion aus, indem sie als Cytokine bezeichnete Signalstoffe abgeben. Diese Proteine rekrutieren Abwehrzellen aus der Blutbahn, darunter weitere Fresszellen, insbesondere Monocyten (die zu Makrophagen heranreifen können) und neutrophile Granulocyten.

Das adaptive Immunsystem
Seine Stars sind die B-Zellen und T-Zellen. Erstere geben nach Aktivierung Antikörper ab. Diese Abwehrmoleküle erkennen jeweils nur »ihr« Antigen: eine molekulare Struktur eines ganz bestimmten Erregers. Sie neutralisieren ihn oder markieren ihn als zu zerstörendes Ziel. T-Zellen erkennen ihr Antigen, wenn andere Zellen es ihnen präsentieren. Einige tragen zur Aktivierung von T- wie B-Zellen bei (nicht dargestellt); andere T-Zellen attackieren infizierte Zellen direkt. Aus der B- und T-Klasse gehen Gedächtniszellen hervor, die den ihnen bekannten Erreger künftig schneller bekämpfen.

TAMI TOLPA

▷ sich den molekularen Aktionen von Cytokinen zu widmen begannen. Diese Signalproteine werden von unterschiedlichen Abwehrzellen produziert, darunter von Makrophagen und dendritischen Zellen. Beide gehören zu den weißen Blutkörperchen. Makrophagen – wörtlich: große Fresser – durchstreifen die Gewebe des Körpers auf der Suche nach verdächtigen Anzeichen. Sobald sie beispielsweise ein verräterisches fremdes Protein erkennen, lösen sie eine Entzündungsreaktion aus: Sie verschlingen den eingedrungenen Träger des Proteins, zerstören ihn und setzen eine Reihe von Cytokinen frei. Einige der Moleküle wirken wie Sirenengeheul, das andere Zellen an den Infektionsherd ruft und das Immunsystem als Ganzes in volle Alarmbereitschaft versetzt. Dendritische Zellen – wegen ihrer zweigartigen Ausläufer nach dem griechischen Wort für Baum benannt – zerlegen vereinnahmte Mikroorganismen ebenfalls und eilen zu den Lymphknoten. Sie präsentieren dort Proteinfragmente des Erregers Heerscharen von T-Zellen und geben zugleich Cytokine ab – all dies trägt zur Aktivierung der adaptiven Immunantwort bei.

Eine scheinbare Sackgasse

Um die Funktionen verschiedener Cytokine untersuchen zu können, brauchten Forscher zunächst eine Methode, deren Produktion anzustoßen. Am effektivsten gelang das bei Makrophagen und dendritischen Zellen im Labor, wenn man sie Bakterien aussetzte – und zwar besonderen Komponenten. Vor allem das Lipopolysaccharid (LPS), ein charakteristisches komplexes Zellwandmolekül so genannter gramnegativer Bakterien, löst im Organismus starke Immunreaktionen aus. Beim Menschen verursacht es Fieber und kann zu einem septischen Schock führen – einem tödlichen Kreislaufkollaps, hervorgerufen durch eine überschießende, zerstörerische Aktivität von Immunzellen. Bewirkt wurde diese Entzündungsreaktion von LPS, wie sich herausstellte, weil es Makrophagen und dendritische Zellen zur Abgabe zweier Cytokine veranlasste: Tumor-Nekrose-Faktor-alpha (TNF-alpha) und Interleukin-1 (IL-1).

Tatsächlich stachelten diese beiden Proteine Immunzellen regelrecht an und bestimmten so die entzündliche Antwort. Wenn nicht in Schach gehalten, können sie sogar Erkrankungen wie

rheumatoide Arthritis heraufbeschwören. Das Autoimmunleiden geht mit einer exzessiven Entzündung einher, welche die Gelenke zerstört. Daher lag die Idee nahe, die Effekte von TNF-alpha und IL-1 zu unterbinden sei eine Möglichkeit, das Fortschreiten der Krankheit zu bremsen und das Leiden von Arthritis-Patienten zu lindern. Dazu bedurfte es aber genauerer Einblicke in die Funktionsweise dieser Signalmoleküle. Als Erstes galt es, jene Rezeptoren zu identifizieren, an die sie andocken.

1988 entdeckten John Sims und seine Kollegen bei der Firma Immunex in Seattle ein solches Protein, das auf IL-1 ansprach. Dieser Rezeptor kam auf vielen unterschiedlichen Körperzellen vor, einschließlich Makrophagen und dendritischen Zellen. Sein Außenelement, das IL-1 band, ragte aus der Zellmembran heraus, während das innere Element das Andocken ähnlich einer Türglocke innen vermeldete. Sims hoffte, der Aufbau des Innenteils würde einen gewissen Fingerzeig geben, wie das Protein die Meldung dort weitergab – beispielsweise, welche Signalmoleküle es in der Zelle aktivierte. Aber dieser Abschnitt des menschlichen IL-1-Rezeptors war mit nichts vergleichbar, was die Forscher kannten. Sie kamen nicht weiter.

Ein toller Rezeptor

Dann, 1991, machte Nick J. Gay von der Universität Cambridge in Großbritannien eine seltsame Entdeckung. Er befasste sich mit einem völlig anderen Problem, suchte nach Eiweißstoffen, die einem Rezeptorprotein namens Toll bei Taufliegen ähnelten. Christiane Nüsslein-Volhard am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen hatte diesen Namen gewählt, weil sich entwickelnde Taufliegen ohne es verrückt – wie toll durcheinander geraten – aussehen. Im Embryo trägt der Rezeptor dazu bei, dass sich der Rücken vom Bauch differenziert.

Gay durchmusterte alle bis dahin bekannten Gensequenzen in einer Datenbank auf eventuelle Ähnlichkeiten mit dem Gen für Toll. Er hoffte so, Gene zu finden, die für verwandte Eiweißstoffe kodieren. Verblüfft entdeckte er, dass ein Teil des Toll-Proteins in seiner Bauanweisung auffällig dem scheinbar einzigartigen Innenstück des IL-1-Rezeptors glich.

Warum sollte aber ein an Entzündungsreaktionen beteiligtes menschliches ▷

Bakterienalarm in der Zelle

Viele Zellen der angeborenen Abwehr tragen Toll-artige Rezeptoren (TLRs), benannt nach dem Protein Toll. Diese Moleküle dirigieren die angeborene Immunantwort und spielen eine entscheidende Rolle bei den adaptiven Reaktionen. Beispielsweise löst TLR4 Abwehrmechanismen gegen so genannte gramnegative Bakterien aus. Der Rezeptor erkennt sie am Lipopolysaccharid (LPS), ihrem charakteristischen Zellwandbestandteil. Daraufhin signalisiert er – im Doppel mit einem gleichartigen Partner – vier anderen Molekülen, dass er LPS gebunden hat. Diese Proteine – MyD88, Mal, Tram und Trif – lösen eine molekulare Kaskade aus, die einen Hauptregulator der Entzündungsreaktion aktiviert: den nukleären Faktor Kappa B (NF-κB). Er schaltet Gene für Cytokine und andere Immunaktivatoren an. Diese erzeugten Cytokine (rechts) rufen Entzündungen hervor und tragen zu Aktivierung von B- und T-Zellen bei.

gramnegatives Bakterium
LPS
TLR4
TLR4
Mal
Tram
MyD88
Trif
aktivierter NF-κB
dendritische Zelle
Interleukin 1 (IL-1) und Tumor-Nekrose-Faktor-alpha (TNF-alpha): verstärken Entzündungsreaktionen
IL-8: lockt Neutrophile an
IL-12: fördert Aktivitäten von T-Zellen
IL-6: fördert Aktivitäten von B-Zellen

TAMI TOLPA



AUS: BRUNO LEMAITRE ET AL., 1996, CELL, BD. 86, S. 973-983

◀ **Einer Pilzinfektion erliegen Taufliegen ohne Toll-Protein rasch – ihr Körper sieht regelrecht pelzig aus. (Die wabenartige Struktur rechts ist das Auge). Dies lieferte 1996 einen der ersten Hinweise darauf, dass Toll-Proteine mit der Krankheitsabwehr zu tun haben.**

▷ Protein dem ähneln, das dem Fliegenembryo sagt, wo sein künftiges Oben ist? Des Rätsels Lösung kam 1996, als Jules A. Hoffmann und seine Kollegen vom französischen Nationalen Forschungszentrum CNRS in Straßburg zeigten, dass das Toll-Protein geschlüpften Taufliegen hilft, sich vor Pilzbefall zu schützen (siehe Abbildung oben). Es scheint somit sowohl an der Entwicklung des Embryos als auch an der Immunität des reifen Tiers beteiligt zu sein.

Die Ähnlichkeit des IL-1-Rezeptors beschränkte sich allerdings auf das innere Element. Dies veranlasste Forscher, nach Humanproteinen Ausschau zu halten, die auch außen Toll ähnelten. Ein gut funktionierendes »Design« wird gewöhnlich im Lauf der Evolution beibehalten, regelrecht konserviert – und wenn Toll Immunität bei Fliegen vermittelte, dann könnten vielleicht ähnliche Proteine dasselbe beim Menschen tun.

Dank eines Tipps von Hoffmann wurden 1997 Ruslan Medzhitov und Charles A. Janeway jr. von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) fündig: Das erste derartige Protein bezeichneten sie als Human-Toll. Binnen etwa sechs Monaten identifizierten Fernando Bazan und seine Kollegen von der Firma DNAX in Palo Alto (Kalifornien) fünf dieser Sorte, die sie *Toll-like receptors* tauften. Einer davon, nämlich TLR4, erwies sich als identisch mit dem Protein von Medzhitov und Janeway.

Damals wussten die Forscher noch nicht genau, wie solche Rezeptoren beim Menschen zur Immunität beitragen könnten. Janeway hatte zwar festgestellt, dass die Produktion von Cytokinen in Gang kam, sobald die Membran dendritischer Zellen mit TLR4 ausstaffiert wurde. Unklar blieb aber, wie eine Infektion TLR4 aktivierte.

Die Antwort kam Ende 1998, als Bruce Beutler und seine Mitarbeiter vom Scripps Institute im kalifornischen La Jolla entdeckten, dass mutierte Mäuse, die nicht auf LPS reagierten, eine defekte Form von TRL4 aufwiesen. Normale Mäuse starben innerhalb einer Stunde nach einer LPS-Injektion an einem septischen Schock; die mutierten Mäuse hingegen verhielten sich so, als wäre ihnen nichts geschehen. Die Mutation im Gen für TLR4 hatte sie unempfindlich gegen diese bakterielle Substanz gemacht.

Somit war TLR4 in der Tat der Sensor für LPS, wurde von ihm aktiviert. Diese Erkenntnis bedeutete einen wesentlichen Durchbruch auf dem Gebiet der Sepsis-Forschung – offenbarte sie doch einen molekularen Entzündungsmechanismus und damit zugleich einen potenziellen neuen Angriffspunkt für die Behandlung einer Störung, die dringend einer wirksamen Therapie bedurfte.

Wächter der Burg – seit Urzeiten

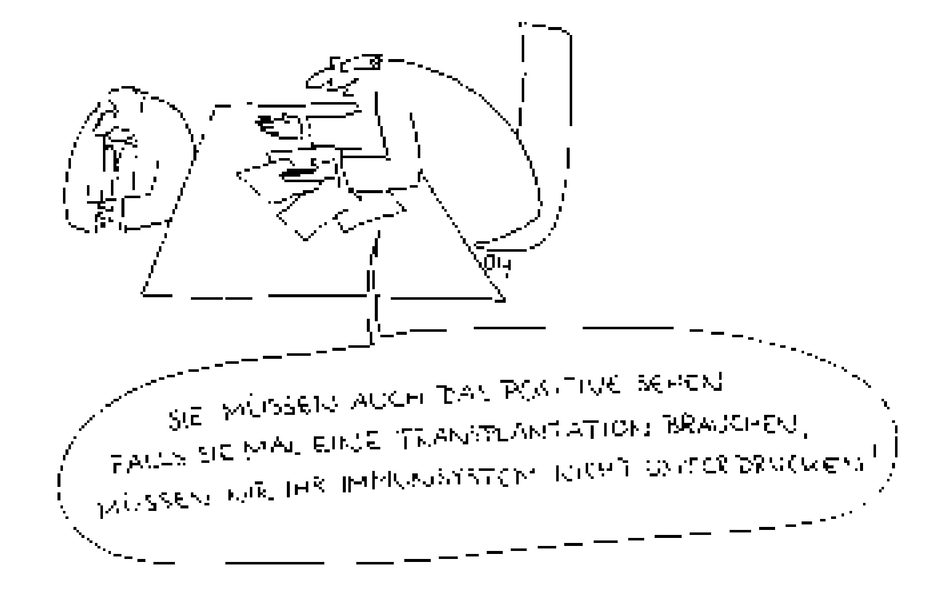
Innerhalb von zwei Jahren machten weitere Forschungen klar, dass die meisten TLRs – von denen inzwischen zehn beim Menschen bekannt sind – Muster lebenswichtiger Moleküle von Bakterien, Viren, Pilzen und Parasiten erkennen. Den einzelnen TLRs kommen dabei spezielle Aufgaben zu (siehe Kasten rechts).

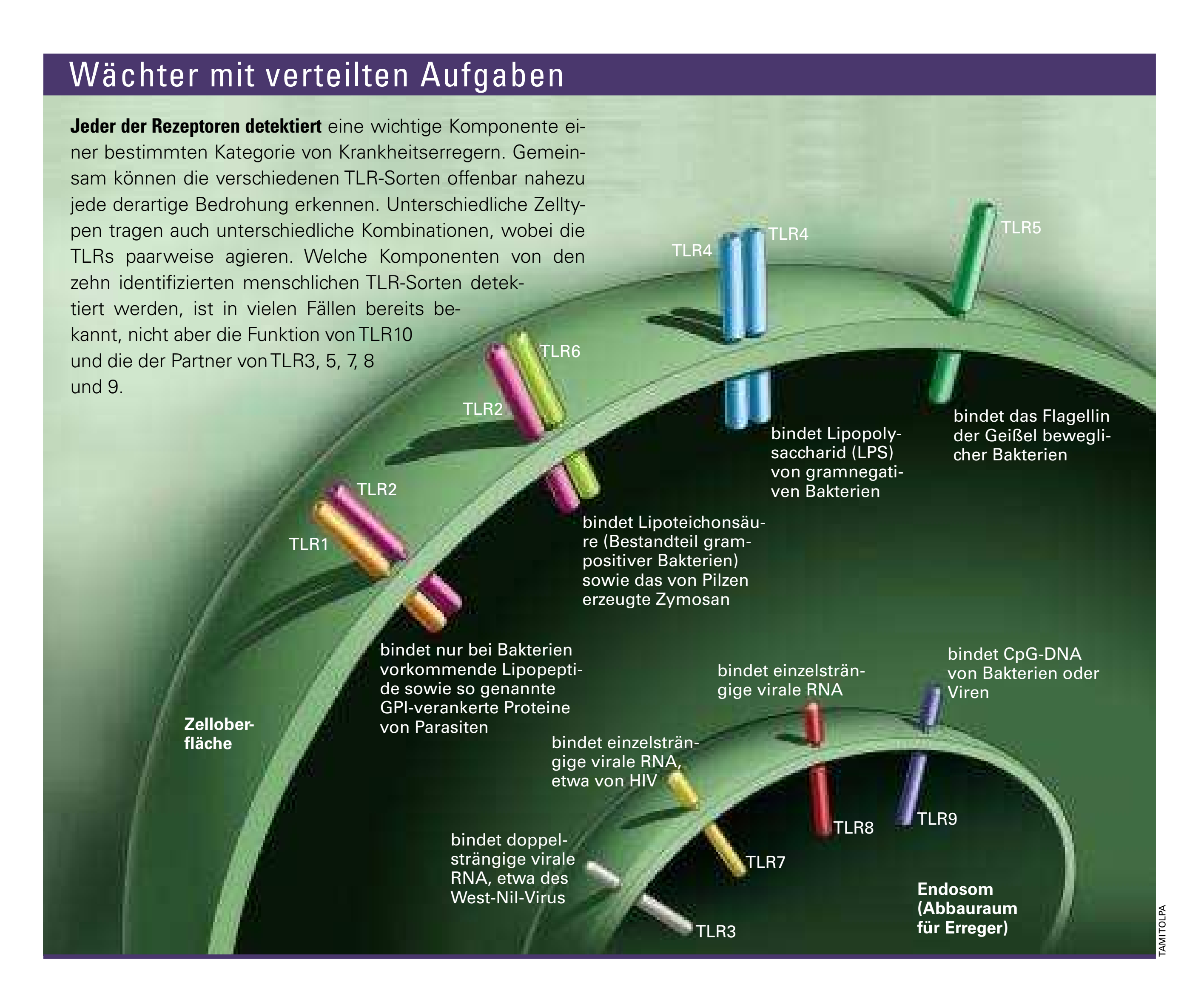
Die Rezeptoren wurden offensichtlich im Lauf der Evolution darauf zugeschnitten, grundlegende molekulare Bestandteile von Krankheitserregern zu erkennen und darauf zu reagieren. Wenn eine dieser verräterischen Komponenten durch eine Mutation eliminiert oder auch nur verändert wird, verkrüppelt unter Umständen der Erreger. Er vermag sich also der Erkennung nicht zu entziehen, indem er diese Bausteine bis zur Unkenntlichkeit abwandelt. Da die Komponenten überdies meist einer Vielzahl von Mikroben gemeinsam sind, reichen uns bereits nur zehn Arten von TLRs als Wächter gegen praktisch jeden bekannten Krankheitserreger.

Die angeborene Immunität ist freilich keine evolutive Errungenschaft des Menschen, sondern stammesgeschichtlich sehr alt. Fliegen verfügen darüber ebenso wie Seesterne, Wasserflöhe und fast jedes andere daraufhin untersuchte Lebewesen. Und viele verwenden TLRs als Auslöser. Der winzige Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* zum Beispiel besitzt einen Sensor für infektiöse Bakterien, sodass er wegschwimmen kann.

Sogar Pflanzen sind reich an TLRs. Die Ackerschmalwand etwa verfügt über 200 Sorten. Die Tabakpflanze setzt eine Variante, das N-Protein, zur Abwehr des Tabak-Mosaik-Virus ein. Höchstwahrscheinlich entstand das erste Toll-artige Protein in einem einzelligen Lebewesen, das noch ein gemeinsamer Vorfahr von Tier und Pflanze war. Letztlich trugen diese Moleküle wohl selbst zu unserer Evolution bei, denn ohne einen wirksamen Verteidigungsmechanismus gegen Infektionen hätten vielzellige Organismen vermutlich nicht überlebt.

Einst hielten Forscher das angeborene Immunsystem für allenfalls so kompliziert wie die Mauer einer Burg. Der eigentliche Kampf würde erst dann stattfinden, wenn ein Erreger diesen Schutzwall durchbrochen hatte und die Truppen dahinter, die T- und B-Zellen, eingriffen.





Wächter mit verteilten Aufgaben

Jeder der Rezeptoren detektiert eine wichtige Komponente einer bestimmten Kategorie von Krankheitserregern. Gemeinsam können die verschiedenen TLR-Sorten offenbar nahezu jede derartige Bedrohung erkennen. Unterschiedliche Zelltypen tragen auch unterschiedliche Kombinationen, wobei die TLRs paarweise agieren. Welche Komponenten von den zehn identifizierten menschlichen TLR-Sorten detektiert werden, ist in vielen Fällen bereits bekannt, nicht aber die Funktion von TLR10 und die der Partner von TLR3, 5, 7, 8 und 9.

Wir wissen heute, dass die Burgmauer mit Wachposten – TLRs – besetzt ist, die Eindringlinge identifizieren und Alarm auslösen. So mobilisieren sie die Truppen und bringen das nötige Arsenal in Stellung, um den Angriff völlig zurückzuschlagen. Kurzum: Die Rezeptoren alarmieren sowohl das angeborene als auch das adaptive Immunsystem.

Das sich neu herauskristallisierende Szenario sieht ungefähr so aus: Wenn ein Krankheitserreger erstmals in den Körper eindringt, werden typische Fremdstrukturen, etwa das LPS gramnegativer Bakterien, von mindestens einem der TLRs erfasst, wie sie auf dendritischen Zellen und patrouillierenden Makrophagen vorkommen. Daraufhin veranlasst der Rezeptor seine Zelle, eine Reihe bestimmter Cytokine abzugeben. Diese Botenstoffe rekrutieren dann zusätzliche Makrophagen, dendritische Zellen und andere Immunzellen, um die marodierenden Mikroben einzukreisen und unspezifisch zu attackieren. Alle Mitstreiter schütten Cytokine aus, welche die klassischen Symptome einer Infektion auslösen können, einschließlich Fieber und grippeähnliche Beschwerden.

Was uns stark macht

Makrophagen und dendritische Zellen, die einen Erreger zerlegt haben, präsentieren Teile ihrer Beute nebst so genannten ko-stimulatorischen Molekülen auf ihrer Oberfläche. Die Präsentation, kombiniert mit den ausgestoßenen Cytokinen, aktiviert schließlich nur jene B- und T-Zellen, die auf eben dieses Feindbild eingeschworen sind. Der kleine Spezialtrupp vermehrt sich im Laufe mehrerer Tage stark und leitet einen ganz gezielten harten Abwehrschlag gegen den Eindringling ein. Ohne den Startschuss durch die TLRs blieben T- und B-Zellen müßig und würden keine komplette Immunantwort aufbauen können, ebenso wenig ein immunologisches Gedächtnis.

Nach der Erstinfektion bleiben genügend B- und T-Gedächtniszellen zurück, sodass der Körper, sollte der Eindringling wiederkehren, effektiver reagieren kann. Diese spezifischen Zellen können so früh und rasch eingreifen, dass erst gar keine Entzündungsreaktionen auftreten müssen. Das Opfer der Infektion fühlt sich folglich weniger krank, bemerkt die Invasion vielleicht nicht einmal.

Angeborene und adaptive Immunität sind daher Bestandteil ein und desselben Gesamtsystems, das Mikroorganismen erkennt und eliminiert. Erst das Wechselspiel zwischen beiden macht unsere Abwehr so stark.

Wie steuern TLRs die Immunreaktionen aber im Detail? Um dies herauszufinden, gilt es jene Moleküle zu identifizieren, welche die Signale aktivierter Rezeptoren von der Zelloberfläche zum Zellkern weitervermitteln. Dort müssen Gene für Cytokine und andere Immunaktivatoren angeschaltet werden. Viele ▷

▷ Forscher beschäftigen sich inzwischen eingehend mit dieser Frage, und sie können bereits mit einigen faszinierenden Entdeckungen aufwarten.

So wissen wir inzwischen, dass sich TLRs, wie viele Oberflächenrezeptoren, einer langen Kaskade von Signalproteinen bedienen – ungefähr wie einst Eimer mit Löschwasser durch viele Hände zum Brandherd weitergereicht wurden. Mit Ausnahme von TLR3 geben alle bekannten anderen ihr Signal an das Adapterprotein MyD88 weiter. Welche Eiweißstoffe noch mitwirken, hängt vom jeweiligen TLR ab: Mein Labor untersucht das von uns entdeckte ähnliche Mal-Protein, das sich an der Übertragung von TLR4- und TLR2-generierten Signalen beteiligt. TLR4 braucht zudem zwei weitere Proteine – Tram und Trif –, TLR3 dagegen nur Letzteres. Wie Shizuo Akira von der Universität Osaka (Japan) nachwies, reagieren genmanipulierte Mäuse, die einige dieser intermediären Signalproteine nicht mehr erzeugen, auch nicht mehr auf Mikrobenprodukte. Hier könnten vielleicht Ansatzpunkte für neu zu entwickelnde entzündungshemmende und antimikrobielle Medikamente liegen.

Gefährliche Fehler

Da die Rezeptoren mit unterschiedlichen Garnituren von Signalproteinen zusammenarbeiten, aktivieren sie unterschiedliche Gruppen von Genen. Die Reaktion der Zelle wird dadurch besser auf den jeweiligen Erregertyp abgestimmt. TLR3 und TLR7 registrieren beispielsweise das Vorhandensein von Viren. Die von ihnen angestoßene molekulare Kaskade veranlasst die Produktion und Abgabe von Interferon, dem bedeutendsten antiviralen Cytokin. TLR2, der auf Bakterien anspricht, regt die Freisetzung eines Cytokin-Cocktails ohne Interferon an, der sich besser eignet, einen wirksamen antibakteriellen Gegenschlag des Körpers einzuleiten.

Die Erkenntnis, dass Toll-artige Rezeptoren unterschiedliche mikrobielle Produkte detektieren können und zu einer darauf abgestimmten Reaktion beitragen, stößt nun lang gehegte Annahmen um: Die angeborene Immunität ist keineswegs ein statisches, nicht zur Unterscheidung fähiges System, sondern vielmehr ein dynamisches, das nahezu jeden Aspekt der Entzündung und Immunität regelt.

Angesichts der neuen, zentralen Rolle der Rezeptoren lag der Verdacht nahe, funktionseingeschränkte oder hyperaktive Versionen dieser Rezeptoren könnten zu vielen Infektionskrankheiten und immunbedingten Problemen beitragen. Er bestätigte sich. Eine gestörte angeborene Immunität macht anfälliger für Viren und Bakterien.

So erleiden Menschen mit einer unteraktiven TLR4-Variante im Lauf von fünf Jahren durchschnittlich fünfmal häufiger eine schwere bakterielle Infektion. Und wer an der Legionärskrankheit stirbt, besitzt oft ein mutiertes TLR5-Gen – das nicht mehr funktionierende Rezeptorprotein machte die Betroffenen unfähig, *Legionella*-Bakterien abzuwehren. Andererseits kann eine überschießende Immunreaktion ebenso destruktiv sein. Allein in den USA und in Europa sterben jährlich über 400 000 Menschen an einer Sepsis, die von einer TLR4-vermittelten Überreaktion herrührt.

Andere Studien verweisen auf einen Zusammenhang zwischen Toll-artigen Rezeptoren und Autoimmunerkrankungen wie systemischem Lupus erythematodes und rheumatoider Arthritis. Hierbei könnten TLRs mit Zerfallsprodukten zerstörter Zellen reagieren und eine unangemessene Entzündungsreaktion sowie eine fehlgeleitete Reaktion durch das adaptive Immunsystem fördern. Zum Beispiel zeigte sich bei Lupus, dass TLR9 auch auf körpereigene statt nur auf bakterielle oder virale DNA reagiert.

TLRs als Zielscheibe

Substanzen, die Toll-artige Rezeptoren aktivieren und somit Immunreaktionen verstärken, könnten Impfstoffe wirksamer machen, gegen Infektionen schützen oder die Abwehr sogar zum Zerstören von Tumoren veranlassen. Dagegen eignen sich Hemmstoffe der TLR-Aktivität vielleicht, um Entzündungsreaktionen zu dämpfen. Von beiden Typen werden bereits einige Wirkstoffe untersucht.

Wirkstofftyp	Beispiele
TLR4-Aktivator	MPL von Corixa in Seattle (US-Bundesstaat Washington), zur Behandlung von Allergien und als Impfstoff-Adjuvans (unspezifischer Aktivator des Immunsystems), große klinische Studien laufen
TLR7-Aktivator	ANA245 (Isatoribin) von Anadys in San Diego (Kalifornien), antivirales Mittel, erste klinische Studien bei Hepatitis C
TLR7- und TLR8-Aktivator	Imiquimod von 3M in St. Paul (Minnesota), zur Behandlung von Genitalwarzen, Basalzell-Hautkrebs und aktinischer Keratinose (Frühstadium von Hautkrebs), auf dem Markt
TLR9-Aktivator	ProMune von Coley in Wellesey (Massachusetts), Impfstoff-Adjuvans und Mittel zur Behandlung von Schwarzem Hautkrebs, Non-Hodgkin-Lymphom und Asthma, große klinischen Studien laufen
TLR4-Inhibitor	E5564 von Eisai in Teaneck (New Jersey), Wirkstoff gegen Sepsis, frühe klinische Studien laufen
allgemeiner TLR-Inhibitor	RDP58 von Genzyme in Cambridge (Massachusetts), zur Behandlung von Colitis ulcerosa und Morbus Crohn, größere klinische Studien stehen bevor
allgemeiner TLR-Inhibitor	OPN201 von Opsona Therapeutics in Dublin (Irland), zur Behandlung von Autoimmunerkrankungen, wird derzeit an Tiermodellen für Entzündungen getestet

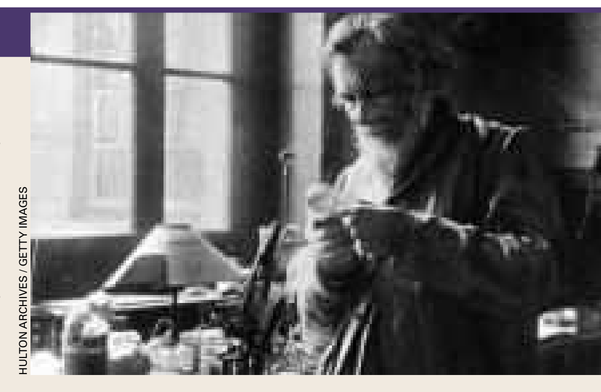
Bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen mögen Toll-artige Rezeptoren ebenfalls eine Rolle spielen. Menschen mit einer mutierten Version von TLR4 scheinen dafür weniger anfällig zu sein. Ein solch träger Rezeptor könnte das Herz schützen, weil Entzündungsreaktionen offenbar zur Bildung von arteriosklerotischen Plaques beitragen, welche die Koronararterien schließlich blockieren. Hier bietet sich daher vielleicht ein zusätzlicher medikamentöser Ansatz, diese pathologischen Prozesse ganz oder teilweise zu verhindern.

Die meisten großen Pharmafirmen interessieren sich für TLRs und die mit ihnen gekoppelten Signalproteine, sehen sie darin doch Zielstrukturen für Wirkstoffe, mit denen sich Infektionskrankheiten und immunologisch beeinflusste Leiden behandeln ließen. Angesichts wachsender Bedrohung durch Antibiotika-Resistenzen, neue gefährlichere Viren und Bioterrorismus bedarf es mehr denn je innovativer Wege, um unsere Körperabwehr im Kampf gegen Infektionen zu unterstützen.

Die Erforschung der Toll-artigen Rezeptoren könnte beispielsweise die Entwicklung sicherer und wirksamerer Impfstoffe vorantreiben. Die meisten Vakzine benötigen als Zusatz ein Adjuvans: einen Hilfsstoff, der die Entzündungsreaktion blitzstartet. Diese wiederum unterstützt das adaptive Immunsystem, die gewünschten Gedächtniszellen zu bilden. Das heute gängigste Adjuvans löst keine komplette adaptive Immunantwort aus, denn es begünstigt B-Zellen gegenüber T-Zellen. Mehrere Firmen setzen auf Verbindungen, die TLR9 aktivieren, da dieser Rezeptor ein breites Spektrum von Bakterien und Viren erkennt und eine starke Immunantwort auslöst.

Metschnikows Flöhe

Die angeborene Immunität, der unter anderem die TLRs und die namensgebenden Toll-Proteine zu neuem Ruhm verhalfen, wurde vor über 100 Jahren entdeckt. Zu Beginn der 1880er Jahre stach der russische Biologe Ilja Metschnikow (1845–1916) einige Dornen in Seesternlarven. Am nächsten Morgen sah er die Fremdkörper von beweglichen Zellen umringt, die – so vermutete er – miteingeschleuste Bakterien verschlangen. Dann entdeckte er bei Wasserflöhen, die Pilzsporen ausgesetzt waren, eine ähnliche Reaktion. Dieser Fressprozess, die Phagocytose, ist ein Eckpfeiler der angeborenen Immunität, und seine Entdeckung trug Metschnikow 1908 den Nobelpreis ein.



HULTON ARCHIVES / GETTY IMAGES

Metschnikow war ein Original. In seiner Nobelpreis-Biografie steht über seine Zeit am Pasteur-Institut in Paris: »Wie erzählt wird, trug er damals gewöhnlich bei jedem Wetter Überschuhe, ferner einen Regenschirm. Seine Taschen quollen über von wissenschaftlichen Papieren, und er trug stets denselben Hut. Wenn aufgeregt, setzte er sich oft drauf.«

Heikle Balance

TLRs lehren uns auch, wie sich der Körper unbedenklicher als bisher gegen denkbare Biowaffen wie Pockenviren wappnen ließe. Die Erreger können die Rezeptoren ausschalten und sich auf diese Weise ihrer Erkennung und Eliminierung entziehen. Durch eine Genmanipulation, die das verantwortliche virale Protein entfernt, ließe sich – wie mein Labor in Zusammenarbeit mit Geoffrey L. Smith vom Imperial College in London feststellte – ein abgeschwächtes Virus herstellen. Ein darauf basierendes Vakzin würde wahrscheinlich bei den Impflingen keine unbeabsichtigte tödliche Pockeninfektion mehr hervorrufen.

Mit dem Rüstzeug zu TLRs und angeborener Immunität könnten Klinikärzte möglicherweise vorhersagen, welche eingelieferten Patienten schlechter mit ihrer Infektion fertig werden und daher intensiver zu behandeln sind. Träger eines mutierten TLR4 beispielsweise würden bei einer bakteriellen Infektion hochdosierte Antibiotika erhalten oder Mittel, die auf irgendeine Weise die Abwehr stärken, um bleibende Schäden infolge der Infektion zu vermeiden.

Selbstverständlich darf die ausgelöste Entzündungsreaktion nicht so stark sein, dass sie mehr schadet als nützt. Und umgekehrt darf keine Medikation, welche die TLR-Aktivität und Cytokin-Abgabe unterdrücken soll, gleichzeitig die Immunabwehr von Infektionen unterbinden.

Ein warnendes Beispiel geben entzündungshemmende Wirkstoffe, die mit TNF-alpha interferieren. Er ist eines der Cytokine, die nach Aktivierung von TLR4 ausgeschüttet werden. TNF-alpha, der im Zuge von Infektion und Entzündung entsteht, kann sich in den Gelenken von Patienten mit rheumatoider Arthritis anhäufen. Die Mittel wirken zwar lindernd, aber einige Betroffene entwickelten Tuberkulose. Die Infektion bestand vermutlich bereits latent, doch ein Zügeln der Entzündungsreaktion kann auch die spezifischen Reaktionen gegen einen Erreger schwächen und so diese Bakterien wieder aufleben lassen.

Über TLRs werden also adaptive Immunität und Entzündung im Gleichgewicht gehalten. Forscher und Pharmafirmen suchen nun nach Wegen, diese Steuerungen so zu manipulieren, dass sich Entzündungen hemmen lassen, ohne die Immunität zu beeinträchtigen.

Noch vor wenigen Jahren unbekannt, stehen heute TLRs – wegen ihrer zentralen Rolle in der vordersten Linie der Abwehr – hoch im Kurs. Sie verwandelten die angeborene Immunität vom Aschenputtel zur Ballkönigin. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Luke A. J. O'Neill promovierte 1985 in Pharmakologie an der Universität London mit einer Arbeit über das entzündungsfördernde Interleukin-1. Er ist Forschungsprofessor der Science Foundation in Irland und leitet die Abteilung Biochemie am Trinity College in Dublin.

TLRs: Professor Mechnikov, sit on your hat. Von L. A. J. O'Neill in: Trends in Immunology, Bd. 25, Nr. 12, S. 687, Dezember 2004

Toll-like receptor control of the adaptive immune response. Von A. Iwasaki und R. Medzhitov in: Nature Immunology, Bd. 5, Nr. 10, S. 987, Oktober 2004

Interferences, questions, and possibilities in Toll-like receptor signaling. Von Bruce Beutler in: Nature, Bd. 430, S. 257, 2004

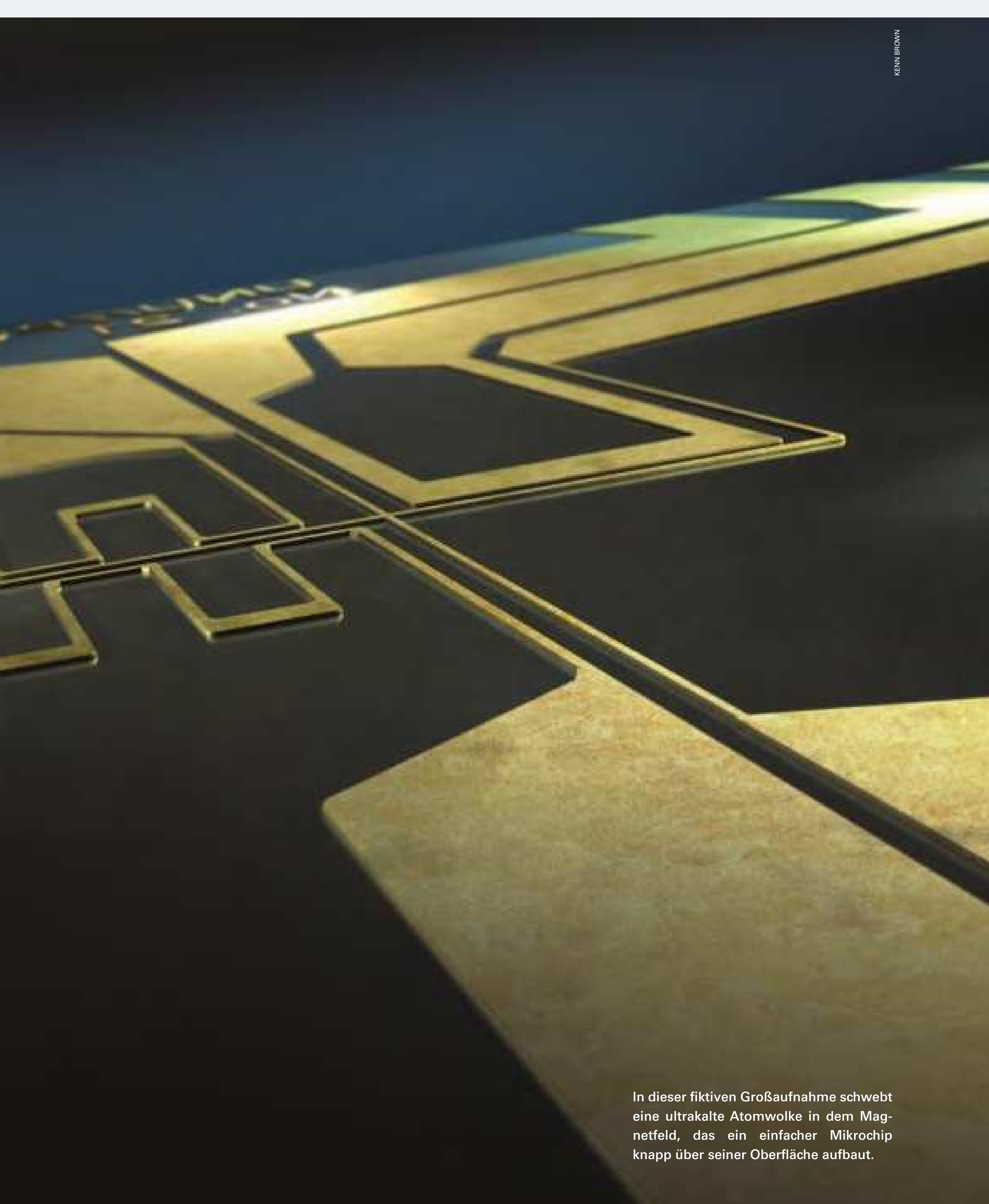
Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Atom-Chips

Fließbänder für Quantenwolken

Spezielle Mikrochips sind fähig, ultrakalte Atomwölkchen herzustellen und zu manipulieren. Aus solchen »Atom-Chips« könnten schon bald präzise Sensoren für Navigationszwecke sowie Komponenten künftiger Quantencomputer hervorgehen.


KENN BROWN

In dieser fiktiven Großaufnahme schwebt eine ultrakalte Atomwolke in dem Magnetfeld, das ein einfacher Mikrochip knapp über seiner Oberfläche aufbaut.

Von Jakob Reichel

Auch ein Jahrhundert nach ihrer Entstehung bleibt die Quantenmechanik eine irritierende Theorie. Sie hat uns gelehrt, die Materie als Wellenphänomen zu beschreiben, doch in den Dingen um uns herum sind diese Materiewellen viel zu klein, als dass wir sie wahrnehmen könnten. Obwohl die Quantengesetze im Prinzip für Objekte jeglicher Größe gelten – von den Elementarteilchen bis zum Universum als Ganzem –, erleben wir in unserer Alltagswelt weder Materiewellen noch andere Quanteneffekte.

Aus Gründen, die auch die Physiker noch nicht ganz verstehen, bleiben die seltsamen Gesetze der Quantenmechanik verborgen, wenn viele Teilchen ungeordnet in Wechselwirkung treten oder die Temperatur deutlich über den absoluten Nullpunkt steigt – also immer dann, wenn die Dinge, wie in der makroskopischen Welt nun einmal üblich, ein wenig komplizierter werden. Darum verbindet man mit Quantenphänomenen meist nur die exotische Welt der Elementarteilchen und abstrakte Gedankenexperimente – etwa die berühmt-berüchtigte Schrödinger-Katze, die in einem zugleich toten und lebendigen Quantenzustand verharrt (siehe »100 Jahre Quantentheorie« von Max Tegmark und John Archibald Wheeler, Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 68).

Doch seit einiger Zeit wandelt sich dieses Bild. Den Physikern gelingt es, die Seltsamkeiten der Quantenwelt in immer größerem Maßstab aufrechtzuerhalten und immer direkter zu beobachten. Ein besonders schönes Beispiel ist das Bose-Einstein-Kondensat (BEK), dessen Erzeugung 1995 erstmals gelang und 2001 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. In einem solchen Quantenkondensat versammeln sich Tausende von Atomen in ein und demselben Zustand. Die Materiewellen all dieser Atome sind identisch und überlagern sich exakt. Sie bilden eine makroskopische Materiewelle, die sich leicht beobachten lässt. Wenn ein Bose-Einstein-Kondensat erst einmal fabriziert ist, braucht man kaum mehr als eine herkömmliche Videokamera, um die Wellennatur der Materie mit eigenen Augen zu sehen.

Die plötzliche Verfügbarkeit makroskopischer Materiewellen hat einen echten »BEK-Boom« ausgelöst. Hunderte von Theoretikern und Experimentatoren, die zuvor in ganz unterschiedlichen Physiksparten tätig gewesen waren, stürzten sich auf das neue Gebiet. Quanteneffekte, die früher als praxisfern und rein theoretisch gegolten hatten, gewannen auf einmal konkrete experimentelle Bedeutung. Wegen der engen Analogie zwischen der kohärenten Materiewelle eines Quantenkondensats und dem kohärenten Lichtstrahl eines Lasers lassen sich BEKs als »Atom-Laser« beschreiben. Diese Kondensate versprechen handfeste praktische Anwendungen – von Atom-Interferometern zur hochpräzisen Flugzeugnavigation bis zu »Atom-Laser-Druckern« für die Fabrikation immer kleinerer Mikrochips.

Aufwändige Tiefstkühlung

BEKs sind zwar leicht zu beobachten, aber äußerst schwer herzustellen. Der Phasenübergang von einer klassischen – nichtquantenmechanischen – Atomwolke zum Quantenkondensat erfordert extreme Kühlung auf weniger als ein millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt. Um so tiefe Temperaturen zu erreichen, müssen die Atome in einer Vakuumzelle isoliert, von einem Magnetfeld in der Schwebe gehalten und sukzessive mit zwei verschiedenen Methoden gekühlt werden: Laserkühlung und Verdampfungskühlung (siehe »Ultrakalte Atome« von Yvan Castin, Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 28). Die geringste unkontrollierte Wechselwirkung mit der Umgebung würde den empfindlichen Quantenzustand zerstören. Deshalb umringt in den rund fünfzig Forschungslabors, die mittlerweile mit BEKs experimentieren, tonnenschweres Hightech-Gerät die winzige Atomwolke. Penibel gereinigte Ultrahochvakuum-Apparaturen bewahren die Atome vor den heftigen Stößen, die sie in einem Gas bei Raumtemperatur erleiden müssten.

Eine Schlüsseltechnik für all diese Experimente sind Magnetfallen, welche die Atome mit Hilfe magnetischer Felder einfangen und in Schwebe halten. Nur in derartigen Fallen funktioniert die Verdampfungskühlung – und zwar umso schneller und wirksamer, je stärker die Falle die Atome auf kleinstem Raum zusammendrängt. Zu diesem Zweck umgeben die Forscher ihre Vakuumzellen mit möglichst kräftigen, dafür aber unhandlichen Elektromagneteten. Für maximale magnetische Kompression verwenden die BEK-Forscher Hochleistungsspulen aus wassergekühltem Kupferrohr, die oft mehrere Kilowatt an elektrischer Leistung verschlingen. Diese Stromfresser in die hochempfindliche Umgebung von Vakuumzellen und Laseroptik zu integrieren war von Anfang an ein großes Problem. Angesichts derart sperriger und komplizierter Apparate mutet der Gedanke, BEKs könnten eines Tages in mobilen Navigationssensoren oder gar in



JÖRG SCHMIEDMAYER

▲ Im Labor von Jörg Schmiedmayer an der Universität Heidelberg schwebt eine Wolke kalter Lithiumatome über einem Atom-Chip. Die goldbeschichtete Oberfläche des Galliumarsenid-Chips erzeugt ein Spiegelbild der Wolke.

IN KÜRZE

▶ **Bose-Einstein-Kondensate** (BEKs) sind typische Quantenphänomene, in denen die Wellennatur der Materie augenfällig wird. Im BEK bilden alle Atome einer winzigen Gaswolke bei extrem tiefen Temperaturen eine einzige Materiewelle.

▶ Die **Magnetfelder eines Mikrochips** können ein BEK erzeugen, indem sie eine Atomwolke im Vakuum über der Chipoberfläche in Schwebe halten und auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt abkühlen. Solche »Atom-Chips« sind viel kleiner als herkömmliche Magnetfallen, verbrauchen tausendmal weniger Strom, arbeiten schneller und benötigen ein weniger perfektes Vakuum.

▶ **Atom-Chips** könnten als ultrapräzise Navigationssensoren und als Bauteile in künftigen Quantencomputern Anwendung finden.

Atom-Laser-Druckern eingesetzt werden, auf den ersten Blick ziemlich abwegig an. Doch in den letzten drei Jahren hat sich die Situation drastisch verändert: Mittels Mikrochips können wir nun Atomwolken einfangen, transportieren und manipulieren. Ein handliches Quantenlabor, wie es zum Beispiel für den Betrieb empfindlicher Bewegungssensoren nötig wäre, ist heute kein Wunschtraum mehr, sondern ein konkretes Forschungsziel.

Atomwolken über magnetischer Landschaft

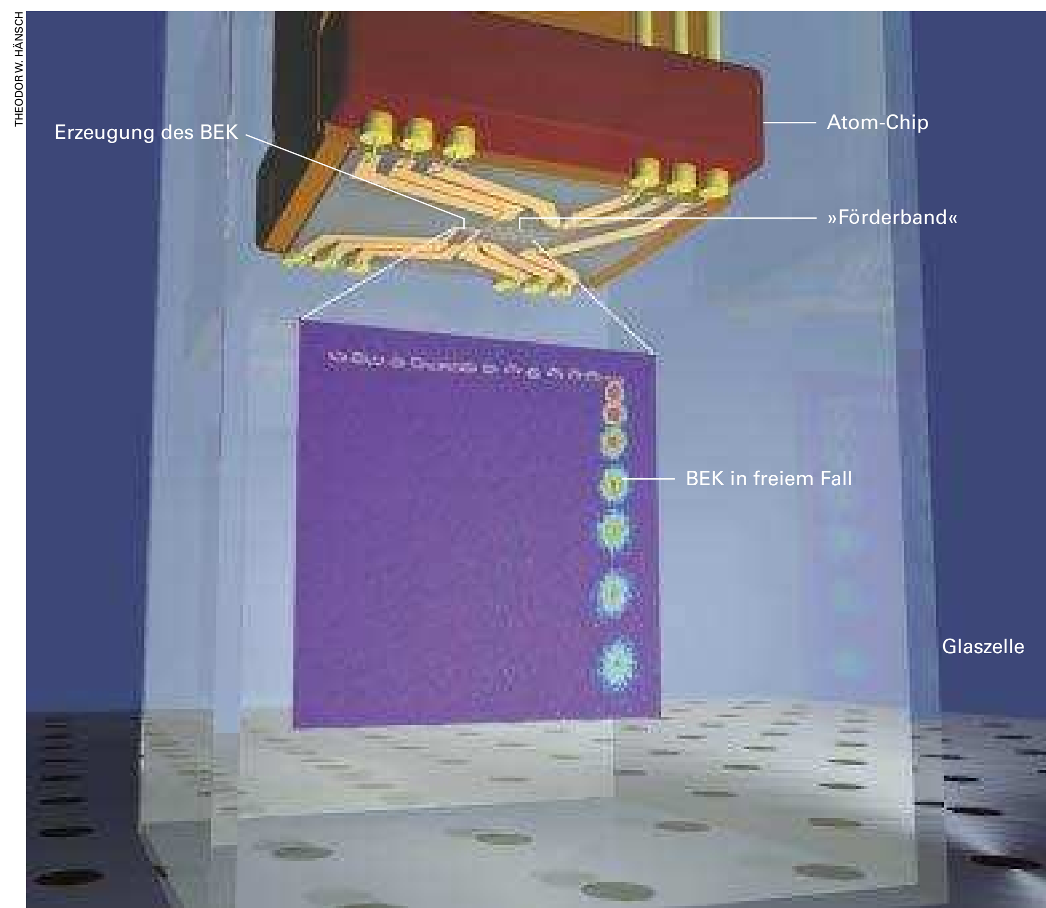
Wie vermag ein Mikrochip eine Atomwolke knapp über seiner Oberfläche festzuhalten und zu verschieben? Die Antwort ist überraschend einfach: Jeder Mikrochip, vom einfachen Verstärker bis zum komplexen Mikroprozessor, erzeugt ganz von selbst Magnetfelder. Computerchips enthalten Tausende von Strom führenden Leiterbahnen. Die Ströme produzieren Magnetfelder, für die sich normalerweise niemand interessiert, zumal sie schon in wenigen Millimetern Entfernung auf unmessbar kleine Werte sinken. Doch knapp an der Chipoberfläche wachsen die Felder umgekehrt proportional zum Abstand – und werden unterhalb von einigen Zehntelmillimetern Distanz schließlich stark genug, um Magnetfallen für frei schwebende Atomwolken zu bilden. Dafür reicht wegen des geringen Abstands zwischen Atomen und Leiterbahn schon ein Watt elektrische Leistung aus. Die Chip-Falle kann also ohne Weiteres mit einer Laptop-Batterie betrieben werden.

Das ist noch nicht alles. Chip-Fallen wirken viel stärker als traditionelle Magnetspulen; sie können die eingefangene Atomwolke in weniger als einer Sekunde bis zur Kondensation abkühlen, während herkömmliche Fallen dafür mindestens eine halbe Minute brauchen. Dieser Zeitgewinn bietet einen entscheidenden Vorteil für künftige Navigationssensoren. Da das Kondensat bei jeder Messung zerstört wird, muss es jedes Mal wieder neu aufgebaut werden. Schnelleres Kondensieren bedeutet mehr Messwerte pro Minute und damit höhere Genauigkeit, da man aus mehr Daten die Messfehler besser herausmitteln kann. Aber auch im Forschungslabor ist Geschwindigkeit begehrt – zum Beispiel, um große Parameterbereiche abzurastern.

Die schnelle Kondensation hat einen weiteren Vorteil: Die Vakuumapparatur wird drastisch verkleinert und vereinfacht, weil der Restdruck im Gerät nun etwa einhundertmal höher sein darf. Warum? Höherer Druck bedeutet zwar mehr Gasmoleküle, die unkontrolliert durch die Apparatur jagen – und wenn diese Moleküle mit der empfindlichen kalten Atomwolke in der Magnetfalle kollidieren, heizen sie die Wolke auf und bewirken Verluste. Doch je schneller die Kühlung, desto weniger Zeit bleibt dem Hintergrundgas für sein Zerstörungswerk und desto mehr Restdruck ist tolerierbar. Deshalb braucht das Vakuum für ein Chip-Kondensat kaum besser zu sein als in einer Fernsehröhre. Das wiederum bedeutet kleinere Pumpen, und durch die Miniaturisierung der Magnetfalle werden auch andere Teile der Apparatur kompakter.

Trotz dieser Vorteile musste die Idee, ein BEK – das wohl kälteste Objekt im gesamten Universum – auf einem Chip zu speichern, zunächst als wissenschaftliches Harakiri erscheinen. Die Chipoberfläche hat zunächst einmal Raumtemperatur, ist also viele Millionen Mal heißer als das Kondensat – und wer käme auf die Idee, Eiswürfel im Hochofen zu erzeugen? So war es nur konsequent, dass die erste Idee eines BEK-Chips, die 1995 von einer Gruppe des California Institute of Technology veröffentlicht wurde, die Kühlung des Chips in einem großen, aufwändigen Flüssighelium-Kryostaten vorsah. Als Theodor W. Hänsch und ich 1997 beschlossen, unsere eigene Chip-Falle zu bauen, kannten wir diesen Vorschlag nicht, doch für uns stand fest: Der Reiz der Methode liegt in ihrer Einfachheit – und so versuchten wir es ohne jede Kühlung des Chips.

Zu unserem Glück verhalten sich Atome völlig anders als Eiswürfel. Eis absorbiert wie alle Festkörper einen großen Teil der infraroten Wärmestrahlung, Gasatome hingegen nur wenige genau bestimmte Wellenlängen, so genannte Resonanzlinien. Darum nimmt das Gas nur einen verschwindenden Bruchteil der vom Chip ausgehenden Wärmestrahlung auf. Heute wissen wir, dass im Zeit- ▷



Um ein BEK zu transportieren, wurde am Max-Planck-Institut für Quantenoptik ein »Atomförderband« entwickelt. Die Leiterbahnen in der Mitte der Chipoberfläche erzeugen eine Kette von Magnetfallen, deren Position durch die Ströme in den Leiterbahnen gesteuert werden kann. Die Bildserie im dunkelblauen Quadrat wurde aufgenommen, während das Förderband ein BEK entlang der Chipoberfläche 1,6 Millimeter weit transportierte und dann fallen ließ.

▷ rahmen eines BEK-Experiments sämtliche thermischen Wechselwirkungen zwischen Atomwolke und Chipoberfläche vernachlässigbar sind – vorausgesetzt, der Abstand zwischen beiden ist nicht geringer als rund 50 Mikrometer (tausendstel Millimeter).

Allerdings hatten wir eine Menge vertrackter Probleme zu lösen, bevor der Traum vom Miniaturkondensat wahr werden konnte. Zunächst einmal galt es, einen Fallenchip zu konstruieren. Dazu musste ich die Grundlagen – und später auch einige Feinheiten – der Mikro- und Nanofabrikation erlernen, und das war eine sehr lohnende Erfahrung. Der rasante Fortschritt der Nanotechnologie hatte mich schon vorher fasziniert: Obgleich immer neue technische und physikalische Hindernisse auftauchen, werden sie jedes Mal durch kreative Entwicklungen wieder beseitigt, sodass das Miniaturisierungstempo nun schon seit den 1960er Jahren nicht nachlässt.

Die Idee, das kälteste Objekt im Universum auf einem Chip zu speichern, erschien zunächst wie wissenschaftliches Harakiri

Atome in der Chip-Falle

Von den Technologien, die diesen Fortschritt ermöglichen, hatte ich als Spezialist für kalte Atome anfangs nur eine vage Vorstellung. Nach vielen Gesprächen mit Experten, dem Konsultieren zahlreicher Webseiten und einiger Bücher fand ich eine Methode, die mir für den Fallenchip geeignet schien. Sie nutzt Goldleiterbahnen auf keramischen Substraten und wird normalerweise in der Leistungs- und Mikrowellenelektronik eingesetzt.

Nachdem das Problem der Chipherstellung gelöst war, standen wir am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und der Münchener Universität vor der nächsten großen Herausforderung: Wie lockt man Atome in eine Chip-Falle? Genau wie für das Speichern in einer großen Spulenfalle müssen die Atome zunächst auf einige Mikrokelvin (millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt) vorgekühlt werden; sonst vermag die Magnetfalle sie nicht festzuhalten. Für diese Vorkühlung kommt nur eine so genannte magneto-optische Falle (MOT, von *magneto-optical trap*) in Frage. Sie besteht im Wesentlichen aus sechs Laserstrahlen, die ein dreiachsiges Kreuz bilden, mit dem Kreuzungspunkt im Zentrum der Falle. Auf diese Weise werden die Atome durch Wechselwirkung mit dem Laserlicht in allen Bewegungsrichtungen abgebremst. Doch wie passte dieses dreidimensionale Strahlkreuz zu unserem Fallenchip? Der Chip blockiert unweigerlich mindestens einen der Strahlen, und der Kühlmechanismus funktioniert nicht mehr.

Die Lösung war eine Spiegelschicht auf dem Chip, die zwei MOT-Strahlen reflektiert (siehe Kasten gegenüber). Es gibt genau eine Möglichkeit, Strahlen und Chip so auszurichten, dass die reflektierten Strahlen die blockierten ersetzen. Nun kann die Falle eine kalte Atomwolke direkt über der Chipoberfläche erzeugen. Es gab noch weitere Details zu berücksichtigen – vor allem die richtige Polarisation der Laserstrahlen –, aber die Idee funktionierte, und in der Fachwelt ist das System heute als Spiegel-MOT oder Oberflächen-MOT bekannt. Auf diese Weise löst sich zugleich das Ladeproblem: Sind die Atome einmal vorgekühlt, genügt es, die MOT abzuschalten und gleichzeitig die Ströme in den Leiterbahnen einzuschalten – und schon finden sich die Atome in der Chip-Magnetfalle wieder.

Nach dieser Methode verwirklichten mein Doktorand Wolfgang Hänsel, der renommierte Quantenoptik-Forscher Theodor W. Hänsch und ich 1998 die erste Chip-Falle. Weitere folgten schnell, und die Gruppe von Jörg Schmiedmayer, heute an der Universität Heidelberg, prägte dafür den griffigen Namen »Atom-Chip«. Trotz erster Erfolge bezweifelten viele Fachleute zunächst, dass dieses System jemals Quantenkondensate produzieren würde, vor allem wegen des kleinen Abstands zwischen Atomwolke und Oberfläche. Aber im Sommer 2001 gelang meiner Gruppe – und unabhängig davon der Gruppe von Claus Zimmermann an der Universität Tübingen – erstmals die Herstellung von Bose-Einstein-Kondensaten in Chip-Fallen. Durch einen bemerkenswerten Zufall erreichten unsere beiden Gruppen das lang erhoffte Ziel im Abstand weniger Tage. Zimmermann, der ebenfalls zuvor Mitarbeiter von Hänsch gewesen war, sprach von einer »Verschränkung« der Ideen, in Anspielung auf das berühmte Quantenphänomen. Heute gibt es weltweit bereits ein gutes Dutzend Forschungsgruppen, die Atom-Chips für BEK-Experimente einsetzen, und ihre Zahl steigt schnell.

Im Prinzip genügen ein paar einfach geformte Leiterbahnen, um auf dem Atom-Chip eine Magnetfalle zu erzeugen. Doch der eigentliche Vorteil ist: All die Errungenschaften der Mikro- und Nanofabrikation kommen jetzt der Arbeit mit BEKs zugute. Mit geringem Aufwand lassen sich komplizierte Leiterstrukturen fertigen und entsprechend komplexe magnetische Landschaften erzeugen, um etwa ein Atom-Interferometer oder optische Detektoren zu realisieren.

Meine Münchener Gruppe demonstrierte bereits ein magnetisches Förderband für Quantenwolken (siehe Bild auf der vorigen Seite). Wir entwickelten dafür einen Atom-Chip mit spezieller Leiterbahnstruktur. Wenn die Ströme in den Leiterbahnen auf eine bestimmte Weise moduliert werden, wandert eine Kette von Magnetfallen über die Chipoberfläche. So lässt sich ein Kondensat auf wenige Nanometer (millionstel Millimeter) genau positionieren. Das BEK-Förderband könnte zum Herzstück komplexer Systeme werden – zum Beispiel in künftigen Quantencomputern.

Wellenleiter für Quantenkondensate

Werden drei Strom führende Leiterbahnen parallel angeordnet, so bilden die Magnetfelder eine röhrenförmige Falle, in der sich die Atome entlang der Leiterbahnrichtung frei bewegen können. Diese Röhre ist ein Materiewellenleiter – das Gegenstück zu einer Licht leitenden Glasfaser. Wie Lichtwellen den Krümmungen einer Glasfaser folgen, kann sich auch ein Kondensat als kohärenter Materiestrahl entlang der Achse des magnetischen Wellenleiters ausbreiten. Mehrere Forschergruppen entwickeln solche Wellenleiter auf Chips – aber auch in makroskopischen Systemen – sowie Ladetechniken zum Einspeisen der Atome.

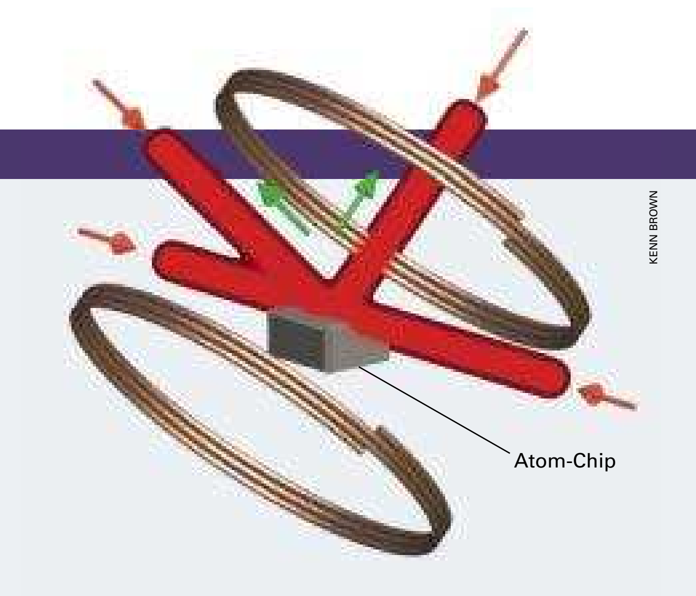
Eine wichtige Anwendung dürfte die Atom-Interferometrie werden. In einem Interferometer überlagern sich zwei Wellen, die zuvor verschiedene Wege gegangen sind, zu einem Streifenmuster: Treffen zwei Wellenberge zusammen, so verstärken sie einander; trifft ein Wellen- ▷

Wie man Gasatome kalt erwischt

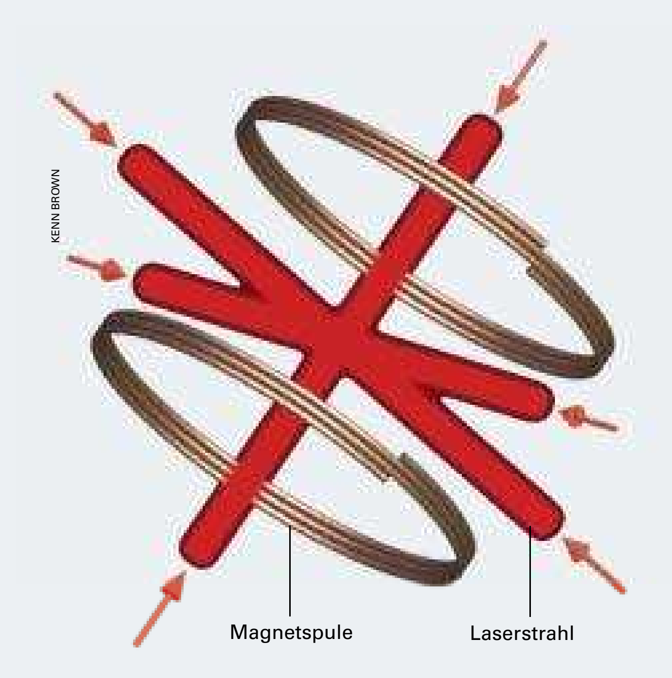
Bei Raumtemperatur verhalten sich die Atome eines Gases praktisch wie kleine harte Kugeln. Doch genau genommen entspricht jedem Atom ein quantenmechanisches Wellenpaket, das über einen kleinen Raumbereich verschmiert ist. Bei normalen Temperaturen spielt diese winzige Ortsunschärfe keine Rolle, doch je »kälter« – das heißt langsamer – die Atome werden, desto mehr vergrößern sich ihre Wellenpakete. Wird das Gas so kalt und dicht, dass sich die einzelnen Wellenpakete überlappen, sammeln sich alle Atome im selben Quantenzustand. Sie bilden eine einzige makroskopische Materiewelle – ein Bose-Einstein-Kondensat (BEK).

Um das zu erreichen, sind komplizierte Apparate nötig. Das Herzstück des Experiments ist ein kleiner, von Magnetspulen umgebener Glasbehälter, in dem zunächst durch Pumpen ein möglichst perfektes Vakuum erzeugt wird. Dann wird eine winzige Gasmenge – meist Rubidium oder Natrium – in den Behälter geladen. In seiner Mitte kreuzen sich sechs Laserstrahlen. Da sie nicht sehr intensiv sein müssen, genügen in der Regel billige Diodenlaser, wie in CD-Spielern gebräuchlich. Bei Raumtemperatur flitzen die Gasatome mit mehreren hundert Kilometern pro Stunde regellos durch den Behälter. Treten sie dabei zufällig in die Kreuzungsregion der Laserstrahlen ein, werden sie vom Laserlicht abrupt abgebremst. Zusätzlich bewirkt das von den äußeren Spulen erzeugte schwache Magnetfeld, dass die bestrahlten Atome zum Zentrum des Strahlkreuzes wandern.

Diese geschickte Kombination aus Laserlicht und Magnetfeld, die magneto-optische Falle (*magneto-optical trap*, MOT), wurde 1987 von Jean Dalibard an der École Normale Supérieure in Paris ausgetüftelt. David Pritchard vom Massachusetts Institute of Technology und Steven Chu, heute an der Stanford-Universität, bauten die erste funktionierende MOT. Heute werden diese Geräte weltweit in zahlreichen Labors verwendet, um Gase aus Rubidium, Natrium und vielen anderen Elementen auf Temperaturen im Mikrokelvinbereich zu kühlen. Leider hat die kalte Atomwolke in der MOT ziemlich geringe Dichte: Der Abstand der Atome ist viel zu groß, als dass ihre Wellenfunktionen sich überlappen könnten. Um höhere Dichten bei gleichzeitig noch tieferer Temperatur zu erzeugen, braucht man einen zusätzlichen Kühlmechanismus – die Verdampfungskühlung.



Die Lösung des Problems ist eine spiegelnde Schicht auf dem Chip. Nun reichen vier statt sechs Laserstrahlen aus, denn Reflexionen (grüne Pfeile) an der Spiegelschicht ergeben die beiden übrigen Strahlen. Auf diese Weise sammelt sich die kalte Atomwolke unmittelbar über der Chipoberfläche.



In einer üblichen magneto-optischen Falle kreuzen sich sechs Laserstrahlen (rote Pfeile) im Zentrum eines Magnetfelds, das von zwei Spulen erzeugt wird. Diese Konfiguration lässt sich aber schlecht mit einem Chip vereinbaren, denn der Chip blockiert unweigerlich mindestens einen der Strahlen.

Sie beruht darauf, dass die Atome eines Gases nicht alle dieselbe Geschwindigkeit haben. Es gibt immer Atome, die fast ruhen, während andere überdurchschnittlich schnell unterwegs sind. Wenn die schnellsten Atome entweichen, sinkt die Temperatur – die mittlere Geschwindigkeit – im übrigen Gas. Die Idee ist nicht neu: Genau so kühlt sich heißer Tee ab, wenn man darauf bläst.

Für die Verdampfungskühlung ultrakalter Atome ist eine Teetasse natürlich das falsche Gefäß. In BEK-Experimenten erfüllt meist eine Magnetfalle diesen Zweck – gleichsam ein tiefer Becher mit unsichtbaren Wänden. Auch hier gilt: Die jeweils energiereichsten Atome entkommen der Falle. Um die Kühlung fortzusetzen, wird die Tiefe des Magnetbechers kontinuierlich verringert.

Für die fortgesetzte Verdampfungskühlung ist entscheidend, dass unter den langsameren Atomen, die in der Falle zurückbleiben, die Energie neu verteilt wird. Sonst nimmt nach Entfernen der schnellsten Atome die Anzahl der Atome mit extrem niedrigen Geschwindigkeiten gar nicht wirklich zu. Diese Umverteilung geschieht durch »gute« Kollisionen zwischen den Atomen in der Falle – im Gegensatz zu den »schlechten« Kollisionen mit dem Hintergrundgas, welche die Atome aus der Falle herausschlagen. Hier zeigen die Atom-Chips ihre Stärke: Schon mit kleinen Strömen erzeugen sie starke Magnetfelder, komprimieren die Atomwolke stärker als gewöhnliche Fallen und erhöhen so den Anteil der »guten« Kollisionen.

berg auf ein Wellental, so löschen sie einander aus. Schon kleinste Einflüsse reichen aus, um die beiden Wellen gegeneinander zu verschieben und ihre Überlagerung merklich zu verändern; darum sind Interferometer höchst empfindliche Messgeräte. Die meisten arbeiten mit kohärenten Laserstrahlen, die über lange Strecken eine einheitliche Folge von Wellenbergen und -tälern aufweisen. Doch auch die Materiewellen von BEKs haben diese Eigenschaft. Werden zwei kohärente Atomstrahlen überlagert, so entsteht ein Muster aus »hellen« Flecken mit vielen Atomen und »dunklen« Flecken mit wenigen.

Atom-Interferometer gab es schon vor den ersten Atom-Chips, und sie haben sich im Lauf der letzten zehn Jahre zu echten Messinstrumenten entwickelt, die in bestimmten Bereichen die Leistung anderer Methoden übertreffen. Trotzdem kann es durchaus noch zehn Jahre dauern, bis sie ihren Weg in kommerzielle Anwendungen gefunden haben.

Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von Sensoren für Rotationen und lokale Schwerkraftänderungen. Diese Größen spielen in der Navigation eine Rolle, insbesondere für Flugzeuge und U-Boote. So haben moderne Verkehrsflugzeuge als unentbehrliche Ergänzung zum Kompass so genannte Laser-Gyroskope an Bord – Laser-Interferometer, die jede Drehung des Flugzeugs exakt verfolgen. Wegen der kürzeren Wellenlänge von Materiewellen können Atom-Interferometer noch um mehrere Größenordnungen genauer messen. Da es dabei um möglichst handliche Instrumente geht, liegen die Vorteile der Miniaturisierung auf der Hand.

Doch die Entwicklung von Atom-Chip-Interferometern steht noch ganz am Anfang. Ein Schlüsselproblem ist der Strahlteiler – Herzstück eines jeden Interferometers –, der den Atomstrahl in zwei kohärente Strahlen aufspalten soll. Dafür müsste jedes einzelne Atom gleichzeitig beiden Wegen folgen; seine Wellenfunktion sollte in zwei Komponenten aufgeteilt werden, ganz analog zu den beiden Zuständen von Schrödingers Katze. Allerdings funktionieren die bisher demonstrierten Atomstrahlteiler eher wie ein Y-Stück am Gartenschlauch: Die Aufteilung erfolgt zu abrupt, jedes einzelne Atom nimmt entweder den rechten oder den linken Weg, aber nicht beide auf einmal. Diese »inkohärenten« Strahlteiler sind für die Interferometrie noch nicht geeignet.

Das erste Chip-Interferometer

Ein Durchbruch gelang kürzlich den Gruppen von Eric A. Cornell und Dana Z. Anderson an der Universität von Colorado in Boulder zusammen mit dem Team von Mara Prentiss an der Harvard-Universität. Sie umgingen das Strahlteilerproblem, indem sie die Materiewelle mit Lichtkräften aufspalteten. So konnten sie erstmals ein komplettes Atom-Chip-Interferometer herstellen. Auch wenn dieses Instrument für praktische Anwendungen noch viel zu kompliziert ist, bedeutet es einen großen Fortschritt für die Materiewellen-Technologie.

Strahlteiler sind aber nicht die einzige Herausforderung für die neue Technologie. Schon 2002 beobachteten die Gruppen um Zimmermann sowie um David E. Pritchard, einen der Pioniere der Atom-Interferometrie, am amerikanischen Massachusetts Institute of Technology (MIT) einen unerwarteten Effekt, als sie ein Kondensat in einen magnetischen Wellenleiter auf dem Chip einkoppelten. Statt sich gleichmäßig auszubreiten wie Wasser in einem Trog, zerfiel das Kondensat in einzelne Fragmente (siehe Kasten unten). Offenbar war der Wellenleiter nicht vollkommen glatt, sondern wies gleichsam kleine Schlaglöcher auf.

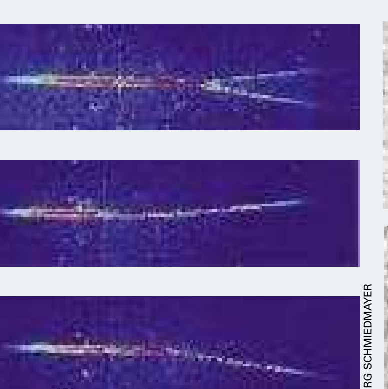
Woher kamen diese Unebenheiten? Hingen sie mit dem Stromfluss zusammen oder mit Verunreinigungen der Oberfläche? Im März 2004 wiesen Alain Aspect und seine Mitarbeiter am Institut d'Optique in Orsay bei Paris durch Kombination von Rastertunnelmikroskopie und eleganten Rechnungen nach, dass die wichtigste Ursache für diese »Korrugationen« des Wellenleiters mikroskopische Variationen der Leiterbahnbreite sind. Winzigste Abweichungen von der idealen, perfekt glatten Leiteroberfläche reichen aus, um den Strom in leicht unregelmäßigen Wellenlinien fließen zu lassen, wodurch wiederum Unebenheiten im Magnetfeld entstehen. Interessanterweise waren diese Abweichungen mit konventionellen Magnetfeldsonden nie beobachtet worden; das BEK stellte sich

Stolpersteine auf dem Weg zum Atom-Chip

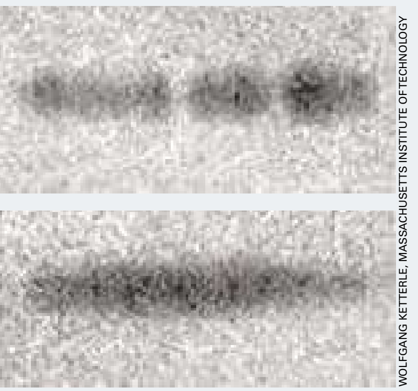
Materiewellen sind anspruchsvolle Reisende. Um Atom-Chips für Anwendungen nutzbar zu machen, müssen neuartige Probleme gelöst werden – zum Beispiel Inkohärenz der Strahlteiler und Fragmentierung der Atomwolken.

Inkohärenz bei Strahlteilern bedeutet, dass jedes Atom an der Gabelung entweder den einen oder den anderen Weg nimmt. Für die Atom-Interferometrie werden aber kohärente Strahlteiler gebraucht, in denen jedes Atom gleichzeitig beide Wege einschlägt. Die Leitergabelung links außen steuert zwar den Fluss von Lithiumatomen, erweist sich jedoch als inkohärenter Teiler.

Die Fragmentierung einer Atomwolke, die knapp über einer Leiterbahn auf einem Chip eingefangen ist, zeigt an, dass das vom Leiter erzeugte magnetische Feld »Schlaglöcher« aufweist (rechts). Sie werden durch mikroskopische Unebenheiten der Leiterbahn verursacht. Wird eine Atomwolke an derselben Stelle von einer rein optischen Falle zusammengehalten, an der die Leiterbahn nicht mitwirkt, dann tritt keine Fragmentierung auf.



JÖRG SCHMIEDMAYER



WOLFGANG KETTERLE, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Die Aufnahmen zeigen typische Probleme: Strahlteiler-Inkohärenz (links) und Fragmentierung der Wolke (rechts).

als weit empfindlichere Sonde heraus. Vor allem zeigen diese neuesten Analysen, wie man das Problem der Korrugationen vermutlich lösen wird: durch noch bessere Fertigungstechniken, die glattere Leiteroberflächen ergeben.

Ein anderes Problem ist viel grundlegender. Die faszinierenden Quanteneffekte würden deutlicher zu Tage treten, wenn man die Fallen noch kleiner machen könnte. Dafür aber müsste deren Zentrum noch näher an die Leiterbahn gerückt werden. Bei Abständen unterhalb weniger Mikrometer ist jedoch eine Wechselwirkung zwischen Atomen und Oberfläche nicht mehr zu vermeiden: Die so genannte Casimir-Polder-Kraft zieht die Atome immer stärker zur Oberfläche. In der Tat beobachtete Vladan Vuletic vom MIT im Jahr 2003 einen schnell ansteigenden Atomverlust, wenn er die Falle der nichtleitenden Chipoberfläche mehr als 1,5 Mikrometer näherte.

Schließlich muss in kleinen Fallen noch das thermische Magnetfeld der Leiterbahnen berücksichtigt werden. Die ungeordnete Wärmebewegung der Elektronen, die sich ihrem gerichteten Strom überlagert, erzeugt in Metallen jeder Art ungeordnete Magnetfelder, die sich räumlich und zeitlich schnell verändern.

Da diese Felder einander in größerer Entfernung aufheben, haben sie bisher nie eine Rolle gespielt. Doch wieder erweisen sich die kalten Atome, wenn sie sehr nahe an die Oberfläche gebracht werden, als extrem empfindliche Sensoren. Die thermischen Magnetfelder lassen dann die Falle so stark zittern, dass die Atome nach und nach über Bord gespült werden. Dieser Effekt war 1999 von Carsten Henkel vorausgesagt worden, einem Theoretiker an der Universität Potsdam. Die erste experimentelle Beobachtung kam 2003 von Ed A. Hinds, heute am Imperial College in London; er hatte schon vor der Ära der Atom-Chips unkonventionelle Atomfallen konstruiert, beispielsweise mit magnetisiertem Videoband.

Dieser Effekt ist zwar theoretisch interessant, aber für manche Anwendungen störend. Doch auch hier gibt es mehrere Lösungsansätze. Man kann den Chip mit flüssigem Stickstoff oder sogar mit flüssigem Helium kühlen; nur wird die Apparatur dadurch unangenehm kompliziert. Doch wie Henkel berechnete und Cornell 2003 experimentell bestätigte, wird der thermische Magnetismus umso schwächer, je höher der spezifische Widerstand des Metalls liegt. Deshalb sinken die Atomverluste, wenn man statt Gold oder Kupfer zum Beispiel Titan verwendet.

Materiewellenleiter und Atom-Interferometer nutzen einen quantenmechanischen Aspekt des Atoms: seine Welleneigenschaften. Andere Effekte versprechen noch raffiniertere Anwendungen. Künftige Quantencomputer sollen das Superpositionsprinzip der Quantenmechanik nutzen, um bestimmte Rechnungen prinzipiell schneller durchzuführen als jede herkömmliche Maschine (siehe »Spielregeln für Quantencomputer« von Michael A. Nielsen, Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 48).

Wie Schrödingers Katze soll ein Atom ungestört in mehr als einem Quantenzustand verharren

Bauteile für Quantencomputer

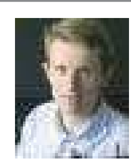
Ein Quantencomputer arbeitet mit Qubits, dem quantenphysikalischen Gegenstück zu gewöhnlichen Bits. Während Bits nur entweder den Wert 0 oder den Wert 1 annehmen, kann ein Qubit sich in jedem beliebigen Überlagerungszustand aus beiden Werten aufhalten – wie Schrödingers gleichzeitig lebendige und tote Katze.

In einem klassischen Computer müssen Rechnungen, in denen ein bestimmtes Bit unterschiedliche Werte annimmt, sukzessive ausgeführt werden. Der Quantencomputer vermag sie simultan durchzuführen; das verschafft ihm bei bestimmten Problemen einen prinzipiellen Zeitvorteil gegenüber jedem klassischen Rechner. Noch ist nicht sicher, ob die Computer der Zukunft wirklich mit Qubits rechnen werden. Zum einen ist der Zeitvorteil des Quantencomputers bisher nur für einige Problemklassen theoretisch nachgewiesen worden, zum anderen verlangt seine praktische Verwirklichung das Herstellen von atemberaubend komplexen Quantenzuständen. Diese Aufgabe ist eng verknüpft mit der Frage, wie ein Quantenzustand an seine Umwelt koppelt und warum die Natur die Quantenphänomene vor unserer makroskopischen Welt zu verbergen scheint.

Selten sind angewandte und fundamentale Fragen so eng verbunden wie auf diesem Gebiet. Darum ist es kein Wunder, dass fast jeder Quantenphysiker heute darüber nachdenkt, wie man mit seinem Lieblingssystem einen Quantencomputer verwirklichen könnte: mit Ionenfallen, Squids (supraleitenden Quanteninterferenz-Detektoren), Makromolekülen – oder vielleicht mit Atom-Chips? Die Idee ist verführerisch, weil solche Quantenchips einerseits traditionellen Mikrochips ähneln und andererseits radikal neue Quanteneigenschaften zeigen. Bauteile wie das Atomförderband könnten zwei beliebige Qubits aus dem Speicher zum Quantengatter schaffen, wo sie kontrolliert miteinander wechselwirken und Rechenoperationen ausführen.

Somit steht die Bose-Einstein-Kondensation mittels Atom-Chips am Anfang einer unabsehbaren Entwicklung. Wie in der Wissenschaft üblich, ist das Ziel nicht von vornherein bekannt, und der Weg ergibt sich Schritt für Schritt aus neuen Entdeckungen. Auch künftig wird es Überraschungen geben – erfreuliche und unerfreuliche. Manche Hindernisse werden sich als überwindbar erweisen, andere die Forscher zwingen, die Richtung zu wechseln. Was immer wir herausfinden, es wird die Quantenwelt unserem Alltag näher bringen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jakob Reichel promovierte an der École Normale Supérieure (ENS) in Paris über Laserkühlung. 1997 kehrte er nach Deutschland zurück und arbeitete am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der Universität München in einem kleinen Team mit Theodor W. Hänsch an Mikrofabrikationstechniken für das Manipulieren kalter Atome. Im Sommer 2004 erhielt Reichel den European Young Investigator Award, einen Förderpreis der Europäischen Forschungsorganisationen. Gegenwärtig stellt er an der ENS ein Forscherteam für Kühlfallen zusammen.

Coherence with atoms. Von Mark A. Kasevich in: Science, Bd. 298, S. 1363, 2002

Special section on ultracold matter in: Nature, Bd. 416, S. 205, 2002

Magnetic chips and quantum circuits for atoms. Von E. Hinds in: Physics World, Bd. 14, S. 39, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AKTIVE GERÄUSCHREDUKTION

Konzert für Triebwerk und Orchester

Geräusch wird störend oft empfunden, sofern nicht mit Musik verbunden.

Von Mark Fischetti
und Klaus-Dieter Linsmeier

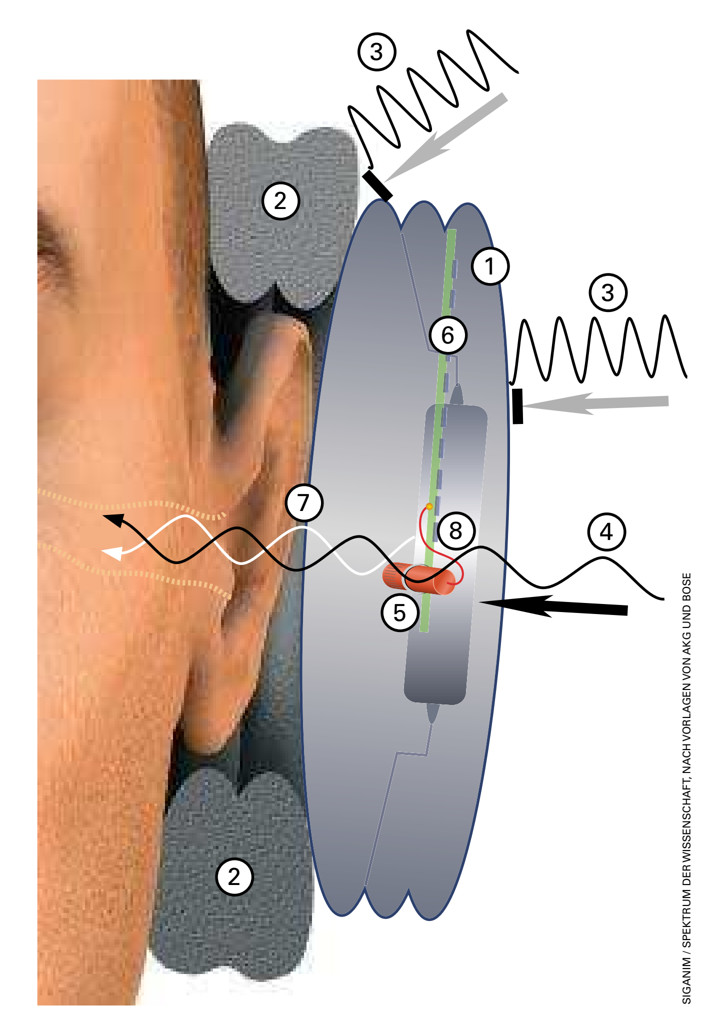
Wer auf der Reise in den Urlaub gern ein wenig Musik hören möchte, hat auf dem Beifahrersitz oder gar an Bord eines Flugzeugs ein Problem: Triebwerks- und Fahrgeräusche stören den Genuss. Ohrstöpsel im Gehörgang oder voluminöse Schallschutz-Kopfhörer, wie sie zum Beispiel Bauarbeiter tragen, reduzieren den Lärmhintergrund um 15 bis 25 Dezibel (Definition siehe rechts). Doch sie sind unbequem zu tragen und unterscheiden nicht zwischen Geräusch und Musik. Mittlerweile sind aber spezielle Kopfhörer auf dem Markt, die zwar keine Wunder vollbringen, doch in gewissem Maße zu einer solchen Differenzierung fähig sind.

Kunststoffschäume dämpfen Frequenzen ab 200 Hertz, doch je langwelliger die Schwingung, desto dicker muss das Dämpfungsmaterial sein. Wer also nicht mit einem Bauarbeiter-Hörschutz in das Flugzeug steigen will, ist mit einer aktiven Geräuschreduktion besser bedient, wie sie seit Kurzem auf dem Markt ist. In den Hörern steckt eine Kombination aus Elektronik, Mikrofon und Lautsprecher. Das Umgebungsgeräusch wird aufgenommen und ein Chip steuert den Lautsprecher so an, dass er neben seinem eigentlichen Job, der Wiedergabe von Musik, noch eine phasenverschobene Schallwelle erzeugt: Umgebungslärm und synthetisches Geräusch heben einander dann auf. Spezielle Elektronikschaltungen rechnen überdies das vom Lautsprecher ausgegebene Nutzsignal, sprich die Sinfonie oder den neuesten Hiphop, aus der Mikrofonaufnahme heraus. Im Bereich von 20 bis 1500 Hertz lassen sich so die akustischen Störenfriede bis zu 5 Dezibel dämpfen, ab 1500 Hertz setzt die passive Dämpfung bis zu 25 Dezibel drauf. ◁

Mark Fischetti ist Redakteur bei Scientific American. Die Autoren danken dem Mikrofon- und Kopfhörer-Hersteller AKG Acoustics für Sachinformationen. **Klaus-Dieter Linsmeier** ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Hinweis!

Am 18.11.2005 erscheint mit dem Dossier **»Wissenschaft im Alltag«** eine Sammlung von Beiträgen aus der gleichnamigen Spektrum-Rubrik. Bestellen können Sie schon jetzt unter www.spektrum.de/wia.



▶ Die Muschel eines Kopfhörers (1) und eine das Ohr abschirmende Polsterung (2) schwächen hochfrequenten Schall (3). Geräusche tieferer Frequenz (4) können ins Innere gelangen, werden aber dort von einem Mikrofon (5) aufgenommen, von einer Elektronik (6) invertiert und dieses Signal (7) über den Lautsprecher (8) ausgegeben.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Mit seiner Warnung** »Musik wird störend oft empfunden, weil stets sie mit Geräusch verbunden« war der deutsche Humorist Wilhelm Busch (1832–1908) seiner Zeit weit voraus. Denn im Allgemeinen sind nicht Geräusche, sondern Töne Gegenstand der Musik. Die bestehen aus periodischen Schwingungen, genauer: aus einem Grundton und ganzzahligen Vielfachen davon. Glocken und Klangstäbe erzeugen Tongemische aus nicht ganzzahligen, »unharmonischen« Vielfachen des Grundtons. Geräusche bestehen aus nichtperiodischen Luftdruckschwankungen in unharmonischen Relationen.

▶ **Ein »doppelt so lautes« Geräusch** hat einen zehnmal so großen Schalldruck wie die Referenz. Derartige Verhältnisse misst man praktischerweise in der logarithmischen Einheit Dezibel; als Ausgangswert dient die frequenzabhängige Hörschwelle. Eine normale Unterhaltung findet bei 50 bis 60 Dezibel statt, auf der Autobahn herrschen schon 70 bis 75 Dezibel, in einer Verkehrsmaschine sogar 75 bis 80 Dezibel. 85 Dezibel schaden bereits dem Gehör.

▶ **Die US-Airforce testete** die aktive Geräuschminderung erstmals in den 1950er Jahren, doch die zur Miniaturisierung notwendigen Komponenten standen erst zwanzig Jahre später zur Verfügung. Amar Bose, Begründer des gleichnamigen Hi-Fi-Unternehmens, entwickelte entsprechende Kopfhörer für das Militär und lieferte sie 1989 auch an die zivile Luftfahrt. Inzwischen sind auch erste Produkte für den Privatkunden auf dem Markt.



▲ **Geräusche unterdrückt man am besten durch destruktive Interferenz: Eine um 180 Grad phasenverschobene Schallwelle vergleichbarer Amplitude löscht sie teilweise aus. Ganz gelingt dies nicht, denn das Ausgangssignal ist zu komplex.**

Im Schatten von Riesen

Félix Tisserand führte einst die klassische Himmelsmechanik zu neuen Höhen. Doch der französische Astronom stand niemals im Licht der Öffentlichkeit – seine Leistungen wurden vom Ruhm seines Landsmanns Pierre-Simon Laplace überdeckt.

Von William I. McLaughlin und Sylvia L. Miller

Der amerikanische Essayist, Dichter und Philosoph Ralph Waldo Emerson (1803–1882) erklärte einst, eine Institution sei der »verlängerte Schatten eines Menschen«, und die gesamte Geschichte ließe sich in die »Biografie einiger standhafter und ernsthafter Personen auflösen«. Historiker mögen das vielleicht anders sehen. Aber wenn die Nachwelt einen großen Geist in Form eines Adjektivs institutionalisiert hat – wie etwa in kopernikanisch, newtonsch oder darwinsch –, dann wirft die derart ausgezeichnete Person zweifellos einen langen Schatten in der Geschichte.

Doch auch wenn unsere Kultur diesen Berühmtheiten tatsächlich viel verdankt, so müssen wir uns fragen, ob wir nicht einige wenige Personen zu Lasten anderer in ein zu helles Licht rücken. Schauen wir in die Geschichte der Wissenschaften zurück, so lassen sich zahlreiche Fälle entdecken, in denen der lange Schatten der Riesen die Reputation und Leistungen ihrer Kollegen aus der zweiten Reihe allzu sehr verdunkelt.

Eines der bekanntesten Beispiele dafür ist Alfred Russel Wallace (1823–1913), der unabhängig von Charles Darwin (1809–1882) die Grundzüge der Evolutionstheorie erkannte, dem aber nie eine vergleichbare Anerkennung zuteil wurde. Der Logiker Kurt Gödel (1906–1978) ist – spätestens seit Douglas R. Hofstadters preisgekröntem Buch »Gödel, Escher, Bach« – auch vielen Nichtmathematikern ein Begriff; doch wer erinnert sich an seinen polnischen Kollegen Alfred Tarski (1901–1983), der mit Gödel eng zusammenarbeitete und Ähnliches vollbrachte?

Auch in den schönen Künsten lässt sich das gleiche Phänomen beobachten. So überragt Mozart seinen Zeitgenossen Salieri – in der Realität ebenso wie in der fiktiven Geschichte, die der bekannte Film »Amadeus« erzählt. Ein weiteres Beispiel ist William Shakespeare, in dessen Schatten andere elisabethanische Dramatiker verschwanden. Der Dichter war sich dieses Phänomens sogar selbst bewusst. In seinem Schauspiel »Julius Cäsar« lässt er Cassius über den römischen Herrscher sagen:

Ja, er beschreitet, Freund, die enge Welt
Wie ein Kolossus, und wir kleinen Leute,
Wir wandeln unter seinen Riesenbeinen
Und schaun umher nach einem
schnöden Grab.

Die Schatten der Bedeutenden verbergen nicht nur einen Teil der Geschichte, sie beeinflussen sogar die tägliche Arbeit der Wissenschaftler. In einem 1968 im Fachmagazin »Science« erschienenen Artikel analysierte der Soziologe Robert K. Merton (1910–2003) das Problem und stieß dabei auf zwei Phänomene, welche die Anerkennung von Wissenschaftlern und ihrer Arbeit verzerren: den »41. Sitz« und den »Matthäus-Effekt«.

Die Bezeichnung »41. Sitz« bezieht sich auf die Praxis der Französischen Akademie, die Zahl ihrer Mitglieder auf 40 zu beschränken. Dadurch blieb manch angesehene Persönlichkeit außen vor. Einige der Ausgeschlossenen waren trotzdem erfolgreich – wie René Descartes (1596–1650), Jean-Jacques Rousseau (1712–1778), Émile Zola (1840–1902) und Marcel Proust (1871–1922). Doch gerade der Erfolg dieser Geistesgrößen macht das Problem umso deutlicher. Merton zeigte auch, dass der Nobelpreis eine kleine Gruppe von Forschern über andere erhebt – die gleichwohl ebenso talentiert sein können. Diese Auszeichnung führt beispielsweise dazu, dass wissenschaftliche Publikationen, an denen ein Nobelpreisträger als Koautor beteiligt ist, häufiger gelesen und zitiert werden als andere.

Es ist offensichtlich, dass eine solche Form der Bevorzugung Schaden anrichten kann. Merton zitierte einen Nobelpreisträger mit den Worten, die Welt neige dazu, bereits berühmten Personen mehr Anerkennung zu zollen als anderen, weniger berühmten. Merton bezeichnet dies als »Matthäus-Effekt«, nach Kapitel 25, Vers 29 des Matthäusevangeliums:

Denn wer da hat,
dem wird gegeben werden,
und er wird die Fülle haben;
wer aber nicht hat,
dem wird auch, was er hat,
genommen werden.

Wir wollen hier versuchen, auf Mertons Einsichten aufzubauen, uns dabei jedoch auf die Wissenschaftsgeschichte beschränken. Wir definieren deshalb den »Schatteneffekt« als Verdunkelung der historischen Bedeutung eines Wissenschaftlers durch diejenige eines anderen, der auf einem ähnlichen Gebiet forschte.



Der Astronom François Félix Tisserand (1845–1896) war einer der letzten Vertreter der klassischen Himmelsmechanik. Als Direktor der Pariser Sternwarte beeinflusste er die astronomische Forschung in ganz Frankreich.

Dieser Schatteneffekt unterscheidet sich also logisch vom Matthäus-Effekt, weil einem vom Schatteneffekt betroffenen Forscher keineswegs schon zu Lebzeiten die Anerkennung versagt worden sein muss. Wallace, Tarski, Salieri und die Konkurrenten Shakespeares waren in ihrer Zeit durchaus hoch angesehen. Außerdem war der den Schatten werfende Wissenschaftler zumeist tatsächlich fähiger als jener, den der Schatten traf.

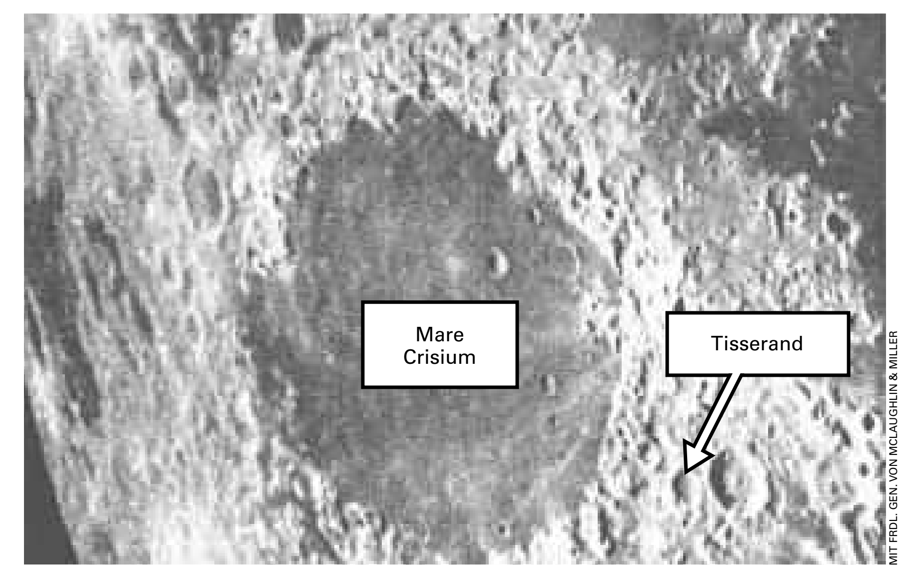
Ein Klassiker der Himmelsmechanik

Es geht uns also nicht um Wiedergutmachung von Ungerechtigkeiten. Vielmehr möchten wir verhindern, dass die Wissenschaftschronisten Forscher in übertrieben ungleicher Manier bewerten. So wenig, wie im Radio immer nur die 40 größten Pophits gespielt oder als Lesetipps stets dieselben Literaturklassiker genannt werden sollten, so sollten wir nicht immer die Biografien einiger Auserwählter endlos wiederholen. Wenigstens ab und an sollte auch einmal einer der im Schatten stehenden Wissenschaftler ins Rampenlicht gerückt werden.

Wir wollen unseren Scheinwerfer auf François Félix Tisserand (1845–1896) richten, einen der hervorragendsten Astronomen des 19. Jahrhunderts. Ihm wurden zu Lebzeiten viele Ehrungen zuteil, und er ist gewiss nicht zu den Opfern des Matthäus-Effekts zu rechnen. Gleichwohl steht er aus heutiger Perspektive völlig im Schatten seines großen Landsmanns Pierre-Simon Laplace (1749–1827). Nicht ganz unschuldig daran ist freilich die ihm eigene Bescheidenheit. Zudem ist Tisserand ein Opfer historischer Umstände: Er wirkte in einer Zeit, in der sich die Astronomie mehr und mehr in eine physikalische Disziplin, die Astrophysik, wandelte und die Ära der klassischen Himmelsmechanik zu Ende ging. Es überrascht darum nicht, wenn dieser vorzügliche Astronom heute kaum bekannt ist.

Sowohl Laplace als auch Tisserand veröffentlichten unter dem Titel »Traité de mécanique céleste« eine mehrbändige Abhandlung über Himmelsmechanik, in der sie den Stand der Forschung am Anfang beziehungsweise am Ende des 19. Jahrhunderts darlegten. Tisserand hatte seine Abhandlung bewusst genauso betitelt wie das Werk seines Vorgängers. »Die Himmelsmechanik wartete auf einen neuen Laplace«, wie der Mathematiker Henri Poincaré (1854–1912) es ausdrückte. »Tisserand glaubte sicherlich nicht, dass er seinem Vorbild gleichkam; und doch war seine Zurückhaltung vielleicht unangebracht.«

Der »Traité de mécanique céleste« ist zweifellos Tisserands Meisterwerk, doch ▷



MIT FRDL. GEN. VON MCLAUGHLIN & MILLER

Der »Atlas photographique de la lune« galt bis Mitte des 20. Jahrhunderts als der beste fotografische Mondatlas. Das Werk entstand an der Sternwarte Paris und wurde begonnen, als Tisserand die Leitung des Observatoriums übernahm. Diese Fotoplatte, aufgenommen am 25. Februar 1909, zeigt unter anderem den später »Tisserand« benannten Krater.

übte er in mehreren Bereichen großen Einfluss aus. Sein Geschick in der öffentlichen Verwaltung übertraf sicherlich jenes von Laplace – den Napoléon Bonaparte nach nur sechs Wochen wieder aus dem Amt des Innenministers entließ. Tisserands Zeitgenossen hoben seine fachliche Kompetenz und Beharrlichkeit, seinen Sinn für Humor, sein gutes Urteilsvermögen und seine Führungsqualitäten hervor.

Im Jahr 1873 wurde Tisserand zum Direktor der Sternwarte in Toulouse ernannt. Seine wichtigste Position jedoch war die des Direktors des Pariser Observatoriums, die er 1892 nach dem Tod von Admiral Ernest Mouchez einnahm. Es heißt, Tisserand habe in dieser Rolle die gesamte französische Astronomie dirigiert. Hervorzuheben ist seine Leitung des Projekts »Carte du ciel«, einer noch von Mouchez initiierten fotografischen Durchmusterung des gesamten Himmels (Bild rechts). Weniger bekannt, aber gleichwohl bis in die ersten Jahre des Raumfahrtzeitalters hinein von Bedeutung, ist ein prachtvoller fotografischer Atlas des Monds. Tisserand gelang es als Direktor, die Finanzierung dieses von Maurice Loewy und Pierre Henri Puiseux mit einem 60-Zentimeter-Teleskop aufgenommenen »Atlas photographique de la lune« zu sichern. Viele halten diesen Mondatlas für den besten, der vor den 1960er Jahren erschienen ist.

Mit seinem analytischen Talent konzentrierte sich Tisserand auf eine Reihe von wichtigen Fragen, mit denen sich die Astronomie während des Großteils ihrer Geschichte konfrontiert sah. Eines dieser Probleme betraf die Mondtheorie, die akkurate Beschreibung der Mondbewegung. Generationen von Astronomen hatten ihre Fertigkeiten an einer solchen Theorie erprobt, um bis dahin rätselhafte Aspekte der Bewegung des Erdtrabanten am Himmel zu erklären. Die Mondbewegung war damals von großer Wichtigkeit – sie ermöglichte nicht nur, Folgerungen aus der Gravitationstheorie zu überprüfen, sondern sie hatte auch Konsequenzen für zivile, militärische und religiöse Belange. Band 3 von Tisserands »Traité« ist zur Gänze dieser Mondtheorie gewidmet. Der Astronom präsentiert darin nicht nur eigene Theorien, sondern fasst auch die wichtigsten Beiträge anderer Forscher zusammen. Tisserand beschreibt die Stärken und Schwächen des damals aktuellen Forschungsstands und skizziert die Richtungen der zukünftigen Forschung.


TRAITÉ

MÉCANIQUE CÉLESTE

F. TISSERAND

TOME III.

PARIS,

MIT FRDL. GEN. VON MCLAUGHLIN & MILLER

Der »Traité de mécanique céleste«, Tisserands größter wissenschaftlicher Beitrag, gibt einen Überblick über das gesamte Feld der Himmelsmechanik. Das vierbändige Werk ersetzte eine ähnliche Abhandlung, die Laplace hundert Jahre früher geschrieben hatte. Band 3 des »Traité« behandelt die Theorie der Mondbewegung.

Ist das Sonnensystem stabil?

Tisserand untersuchte auch die Stabilität unseres Sonnensystems. Die Frage, ob eine gegebene Anordnung von Himmelskörpern stabil ist – also als mehr oder weniger kompakte Gruppe gravitativ gebunden bleibt –, ist von großem Interesse für die Astronomen. Offene Sternhaufen wie die Plejaden beispielsweise lösen sich nach wenigen hundert Millionen Jahren auf; ihre Mitglieder vermischen sich danach mit den anderen Sternen der Galaxis. Im Gegensatz dazu zählen Kugelsternhaufen wie M 13 im Sternbild Herkules zu den ältesten Objekten des Milchstraßensystems und überdauern viele Milliarden Jahre.

Die Antwort auf die Frage nach der Stabilität des Sonnensystems ist ein entschiedenes »Vielleicht«. Gewiss könnte ein nahe vorbeiziehender Stern das Sonnensystem destabilisieren. Betrachtet man Sonne und Planeten jedoch als abgeschlossenes System, so gibt es sowohl eine theoretische als auch eine numerische Möglichkeit, die Stabilität zu untersuchen. Der numerischen Herangehensweise sind allerdings (noch) Grenzen gesteckt, da selbst die heutigen Computer nicht in der Lage sind, die Bewegungen im Sonnensystem über einen ausreichend langen Zeitraum – mehrere Milli-

arden Jahre – zu verfolgen. Der theoretische Ansatz folgt zwei Wegen: Einerseits sucht man Modelle, deren Stabilität sich beweisen lässt, andererseits versucht man alle möglichen Quellen der Instabilität Stück für Stück zu eliminieren. Tisserand folgte dem zweiten Weg.

Er untersuchte den Einfluss bestimmter Planetenbewegungen, um zu prüfen, ob periodisch gravitative Störungen auftreten, die das Sonnensystem zerreißen könnten. Diese Prozesse erwiesen sich aber als nicht stark genug, um eine solche Katastrophe herbeizuführen.

Vermittler der Wissenschaft

Tisserands dritte analytische Domäne war das Dreikörperproblem. Darunter verstehen die Astronomen die Aufgabe, die Bewegungsabläufe von drei Himmelskörpern unter ihrer gegenseitigen Gravitationsanziehung zu bestimmen – zum Beispiel im System Sonne-Erde-Mond. Im Gegensatz zum Zweikörperproblem, das vollständig in Form von Kegelschnittbahnen lösbar ist, lassen sich die Bahnen beim Dreikörperproblem – bis auf einige spezielle Ausnahmen – nicht geschlossen beschreiben. Tisserand gelang es, fortschrittliche analytische Methoden auf dieses schwierige Problem anzuwenden und so das Forschungsfeld voranzubringen.

Neben diesen Fragen der Himmelsmechanik beschäftigte sich Tisserand mit der Theorie natürlicher Satelliten, der Abplattung Neptuns durch seine Eigendrehung (bevor dieses Phänomen überhaupt beobachtet wurde) und mehreren Dutzend anderen Problemen. 1878 wurde er Mitglied der Académie des Sciences, im darauf folgenden Jahr wählte man ihn in das Bureau des Longitudes, dem er viele Jahre als Schriftführer diente.

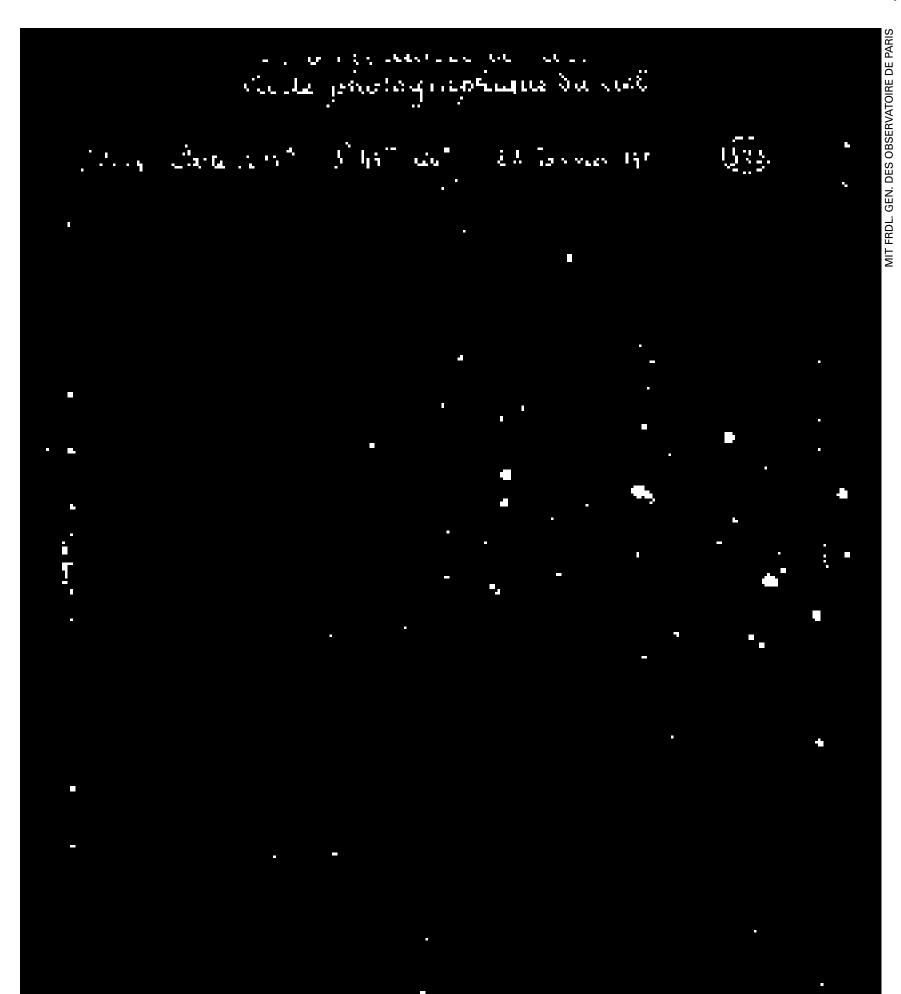
Zu Tisserands Berufsverständnis gehörte auch die Vermittlung der Himmelsmechanik, und er widmete sich auf verschiedenen Ebenen der Lehre. All jene, die dieses Fach studierten, schätzten an seinem »Traité« die klare Art der Darstellung, die Genauigkeit des Ausdrucks und den logischen Aufbau. Sein Vorgänger Laplace war in diesen Dingen weniger geschickt. So beklagt der schottisch-amerikanische Mathematiker Eric T. Bell (1883–1960) in seinem Buch »Men of Mathematics« die fehlende Klarheit in Laplace' »Traité«: »Laplace war an Ergebnissen interessiert, nicht daran, wie er diese erhielt. Er vermeidet es, ein verwickeltes mathematisches Argument in eine kurze, verständliche Form zu bringen, und lässt häufig alles bis auf die Schlussfolgerung weg …«

Wie sehr diese Bewertung zutrifft, zeigt sich auch in den englischen und deutschen Übersetzungen von Laplace' »Traité«. Etwa die Hälfte der englischen Ausgabe besteht aus erläuternden Anmerkungen, die der Übersetzer Nathaniel Bowditch zum besseren Verständnis beigefügt hat; in der deutschen Übersetzung von J.C. Burckhardt nehmen dessen Erläuterungen zu den »Gedanken des Herrn Verfassers« immerhin ein Viertel des Textes ein.

Tisserand verstand es auch, sein Fachgebiet populär darzustellen. Laien und Fachkollegen bewunderten seine Vorträge gleichermaßen, weil sie so einfach zu verstehen waren – egal, ob es um fachliche Inhalte oder um Aspekte der Astronomiegeschichte ging. Am Anfang seiner Laufbahn lehrte Tisserand Analytische Mechanik und Himmelsmechanik an der Pariser Fakultät der Wissenschaften. 1884 gründete er das »Bulletin Astronomique«, für das er sowohl als Redakteur als auch als Autor tätig war.

Was erinnert heute noch an Félix Tisserand? Von seinem Ansehen zeugen ein Mondkrater, der seinen Namen trägt, sowie der zwischen Mars und Jupiter kreisende Asteroid »3663 Tisserand«. Außerdem gibt es in Paris eine »rue Tisserand«. In Tisserands Geburtsort Nuits-Saint-Georges (Burgund) wurde ebenfalls eine Straße nach ihm benannt, vor dem Rathaus steht eine Büste des Astronomen, und eine Schule, die der Forscher als Kind besuchte, heißt heute »Collège Félix Tisserand«.

Sein Name ist all jenen geläufig, die Asteroiden und Kometen erforschen: In Fragen ihrer Bahndynamik kommt »Tisserands Invariante« – auch »Tisserand-Kriterium« genannt – zur Anwendung. Dabei handelt es sich um einen einfa- ▷



MIT FRDL. GEN. DES OBSERVATOIRE DE PARIS

▶ Während seiner Tätigkeit an der Sternwarte Paris leitete Tisserand das Projekt »Carte du ciel«, ein ehrgeiziges Vorhaben zur fotografischen Kartierung des gesamten Himmels. Die Karten enthalten rund zehn Millionen Sterne bis zur 14. Größenklasse. Noch heute ist der Atlas nützlich zur Bestimmung der Eigenbewegung von Sternen, wobei die Astronomen die damaligen Sternpositionen mit denen von heute vergleichen. Die abgebildete Karte zeigt einen Teil des offenen Sternhaufens der Plejaden.

▷ chen algebraischen Ausdruck, herausdestilliert aus der komplexeren Formulierung des so genannten Jacobi-Integrals, das in einer vereinfachten Version des Dreikörperproblems die Rolle der Energie spielt. Mit dem Kriterium lässt sich prüfen, ob die Bahnen von zwei Kometen, die nacheinander in der Nähe des Jupiters beobachtet wurden, tatsächlich zu zwei Kometen gehören oder aber auf ein und denselben Himmelskörper zurückzuführen sind.

Der Riesenplanet verändert zwar die Bahnelemente von Kometen, die nahe an ihm vorüberziehen, doch Tisserands Invariante bleibt davon unbeeinflusst. Wenn also der numerische Wert dieser Größe bei zwei Bahnsegmenten vor und nach der Begegnung mit Jupiter in etwa übereinstimmt, dann gehören diese Bahnsegmente wahrscheinlich zur Umlaufbahn eines einzigen Kometen.

Tisserands Vermächtnis

Trotz der Nützlichkeit dieser Größe glauben wir, dass der »Traité« Tisserands eigentliches Vermächtnis darstellt. Dieses Werk ist wundervoll aufgebaut und so breit angelegt, dass sich seine Lektüre auch heute noch lohnt, obwohl die moderne Forschung inzwischen anderen Fragen bezüglich der Dynamik von Himmelskörpern nachgeht.

Wie groß die Bedeutung des »Traité« ist, zeigt sich beispielsweise in der Würdigung, die ihr in dem modernen Standardwerk »The general history of astronomy« widerfährt, das René Taton vom Centre Alexandre Koyré in Paris und Curtis Wilson vom St. John's College in Annapolis (Maryland) im Auftrag der Internationalen Astronomischen Union herausgegeben haben: Das Register verweist elfmal auf das Stichwort »Tisserand«, siebenmal auf »Traité de mécanique céleste« und einmal auf »Tisserand-Kriterium«. Und der US-Astronom Forest Ray Moulton (1872–1952) schrieb im letzten Absatz seiner »Einführung in die Himmelsmechanik« folgende anerkennenden Worte über den »Traité«: »Betreffend die Himmelsmechanik als Ganzes gibt es kein besseres Werk als das von Tisserand, das sich im Besitz eines jeden befinden sollte, der sich speziell mit diesem Thema befasst.«

Doch trotz seiner Leistungen und der Anerkennung, die er dafür fand, steht Tisserand ohne Zweifel im Schatten von Laplace. Die wissenschaftliche Biografie jenes Gelehrten weist eine Breite und Tiefe auf, wie man sie sonst nur noch bei Isaac Newton findet. Neben seinen Arbeiten zur Himmelsmechanik betätigte sich Laplace als Pionier der Wahrscheinlichkeitstheorie, er erforschte Differenzialgleichungen, befasste sich mit den Grundlagen der Optik, der Akustik und den Kräften zwischen Molekülen, und er beteiligte sich an der Formulierung des metrischen Einheitensystems. Darüber hinaus kann man ihn mit Fug und Recht als einen der Begründer der mathematischen Physik bezeichnen.

In einer Biografie über Alfred Russel Wallace nennt der Autor Michael Shermer als Grund, warum der Biologe weit weniger bekannt ist als Darwin: »Der Mann war zu bescheiden, ein Charakterzug, der zu seiner eigenen Unbekanntheit beitrug.« Für Tisserand verhält es sich ähnlich. Der Astronom Jacques Lévy schreibt im »Dictionary of Scientific Biography« über Tisserands »Traité«:

»Tisserand … präsentiert die Arbeit jedes Autors, vereinfacht ihre Darstellung und integriert die Früchte seiner eigenen Forschungen, ohne immer klar herauszustellen, welches sein eigener Anteil an dieser Präsentation ist. Dreißig Veröffentlichungen werden in dem Traité auf diese Weise abgehandelt. Da die Autoren neuerer Bücher über Himmelsmechanik ihre Informationen häufig eher aus dieser Abhandlung als aus den Originalarbeiten haben, werden Tisserands Beiträge nun zwar verbreitet, ohne dass er jedoch als Urheber genannt wird. Bescheiden wie er war, hätte Tisserand diesen Sachverhalt vermutlich sogar gutgeheißen.«

Über den Stil von Laplace schreibt Lévy: »Laplace ließ die Arbeit seiner Vorgänger in seinen Text einfließen, deshalb wird er oft als Urheber von Ergebnissen zitiert, die gar nicht die seinen sind.« Das ist der Matthäus-Effekt par excellence!

Neben der Reputation von Laplace und seiner eigenen Bescheidenheit führten die Umstände der damaligen Zeit dazu, dass Tisserand in eine Außenseiterposition gedrängt wurde: Er war der führende Kopf einer Disziplin, die zwar wichtig war, von neueren Entwicklungen aber überholt wurde. Die Astronomie des 19. Jahrhunderts war dabei, sich neu aus-

Das Tisserand-Kriterium

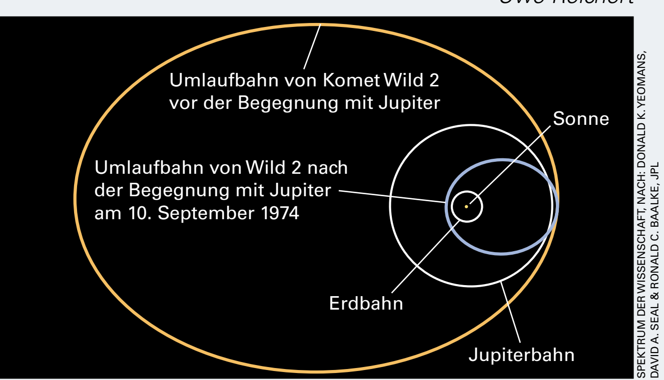
Zieht ein Komet oder Planetoid dicht an einem Planeten vorbei, kann sich die Umlaufbahn des kleinen Himmelskörpers erheblich ändern. Wäre beispielsweise der Vorübergang des Kometen Wild 2 am Jupiter im September 1974 nicht beobachtet worden, so hätte man die ursprüngliche und die veränderte Bahn leicht zwei verschiedenen Kometen zugeordnet und nicht erkannt, dass es sich um ein und dasselbe Objekt handelt (Grafik).

Tisserand definierte eine Größe, die von den Bahnelementen eines Kometen abhängt, ihren Wert bei solchen Vorübergängen aber kaum ändert. Mit diesem Tisserand-Parameter lassen sich die Bahnelemente eines Kometen vor und nach einem nahen Vorübergang an einem Planeten in Beziehung setzen. Auf diese Weise können die Astronomen die Identität eines Himmelskörpers zu verschiedenen Zeiten überprüfen. Für eine Ablenkung am Planeten Jupiter berechnet sich der Tisserand-Parameter zu:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{(1-e^2)\,\frac{a}{a_J}} \cdot \cos i.$$

Hierbei sind a, e und i die große Halbachse, die Exzentrizität und die Bahnneigung der Kometenbahn (die Bahnneigung ist hierbei nicht zur Ekliptik, sondern zur Jupiterbahn gemessen), a_J ist die große Halbachse der Jupiterbahn.

Uwe Reichert



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: DONALD K. YEOMANS, DAVID A. SEAL & RONALD C. BAALKE, JPL

zurichten, um von den jüngsten Entdeckungen in der Physik zu profitieren. Noch zu Beginn jenes Säkulums hatte die Himmelsmechanik – speziell durch das Wirken von Laplace – zu einer Flut neuer Erkenntnisse über die Bewegung der Planeten und ihrer Trabanten geführt.

Die Himmelsmechanik befand sich damals noch an vorderster Front der Forschung. Doch im Verlauf des 19. Jahrhunderts formulierten die Physiker das Prinzip der Energieerhaltung, die Thermodynamik erblühte, die Spektroskopie entwickelte sich zu einem wirkungsvollen Handwerkszeug, und James Clerk Maxwell begründete die Theorie des Elektromagnetismus. War bislang lediglich die Gravitation für die Astronomen von Interesse gewesen, so gewannen nun zusehends die anderen Bereiche der Physik in der Astronomie an Bedeutung. Die Astronomen reagierten darauf unter anderem mit der Gründung des Fachblatts »Astrophysical Journal«, das ab 1895 das bereits 1849 gegründete »Astronomical Journal« ergänzte.



Renaissance der Himmelsmechanik

Auch die Himmelsmechanik selbst änderte ihren Charakter. In den Jahren 1892 bis 1899 erschienen »Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste« von Henri Poincaré und veränderte – getreu seinem Titel – die Disziplin. Das Werk führte zu einer Verzweigung im Entwicklungsweg der Himmelsmechanik, indem es die Grundlagen der Topologie (die von Poincaré mitbegründet wurde) und die Maßtheorie miteinbezog.

Mathematiker hatten die Maßtheorie entwickelt, um Strukturen zu behandeln, die sich mit den Methoden von Newton und Leibniz als unlösbar erwiesen hatten. Neben der klassischen Himmelsmechanik von Newton, Laplace und Tisserand entstand also eine neue Strömung, die im 20. Jahrhundert zu voller Blüte gelangte. Ihren Höhepunkt erreichte sie in den 1950er Jahren mit den Entdeckungen des russischen Mathematikers Andrej N. Kolmogorow (1903–1987). Nach Kolmogorow führte der Poincaré'sche Weg zum Verständnis chaotischer Bewegungen und zu neuen Einsichten darüber, warum bestimmte Anstrengungen der klassischen Himmelsmechanik zum Scheitern verurteilt gewesen waren.

Die Ideen Poincarés ließen im 20. Jahrhundert eine Allianz zwischen der neuen Himmelsmechanik und der modernen mathematischen Forschung entstehen – so wie sich im Jahrhundert davor Himmelsmechanik und Physik verbündet hatten. Doch die klassische Himmelsmechanik endete keineswegs mit Tisserand. Auch im 20. Jahrhundert gab es noch interessante Untersuchungen über die Bewegungen im Sonnensystem und in stellaren Systemen – allerdings abseits der Brennpunkte der astronomischen Forschung, die nun eher in den Bereichen Sternentwicklung und Kosmologie lagen.

Nach dem Start der ersten künstlichen Satelliten Ende der 1950er Jahre spaltete sich die klassische Himmelsmechanik erneut auf und ging eine Partnerschaft mit der Raumfahrt ein. Die Himmelsmechanik spielt nämlich eine entscheidende Rolle für die Planung von Weltraummissionen und für die Navigation von Raumfahrzeugen. Ein Beispiel sind die *gravity-assist*-Manöver, mit denen Raumsonden im Schwerefeld eines Planeten Schwung für ihre weitere Reise holen. Als die ersten Satelliten um die Erde kreisten, stellte sich aber heraus, dass viele Wissenschaftler und Studenten nur kümmerliche Kenntnisse über klassische Himmelsmechanik hatten – und man beeilte sich, dieses Defizit durch Änderungen der Lehrpläne zu beheben. Zu den Maßnahmen gehörte auch ein Nachdruck von Tisserands »Traité«, solange es keine neueren Lehrbücher gab.

Obwohl man sagen könnte, dass Poincaré einen zweiten Schatten über Tisserand warf, ziehen wir es vor, den großen Mathematiker als Auslöser für die Wandlung der Himmelsmechanik anzusehen. Obwohl er zu den Riesen zählt, ist er doch in den populären Darstellungen der Wissenschaftsgeschichte, zumindest im englisch- und deutschsprachigen Raum, unterrepräsentiert: Er wirft keinen Schatten. Doch das ist eine andere Geschichte. Der Wandel der wissenschaftlichen Prioritäten ließ Tisserand scheinbar gestrandet in einer Sackgasse der Forschung zurück. Wir halten es jedoch für angemessener, Tisserand als Schlusspunkt einer großen Tradition zu würdigen.

Es kommt nicht darauf an, Tisserand mit seinem Vorgänger Laplace zu vergleichen. Entscheidend ist, bei all seinen herausragenden Leistungen, sein »Traité«: Diese Abhandlung macht ihn zu einem der Riesen. Das brachte auch Poincaré zum Ausdruck, als er an Tisserands Begräbnis folgende Worte sprach: »Wenn wir seinen Namen lesen, erscheint es uns, als sei er noch unter uns. Und ich sage: Er wird es immer sein, denn die Erinnerung an den Mann, den treuen Freund, wird nicht sterben, bevor der Letzte, der ihn kannte, verschwunden ist. Die Erinnerung an den Wissenschaftler wird ewig leben.« ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



William I. McLaughlin war bis zu seiner Pensionierung 1999 am Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena (Kalifornien) tätig. Dort leitete er die Missionsplanung für den Infrarotsatelliten Iras und war an der Voyager-Mission beteiligt. **Sylvia L. Miller** ist seit 1968 am JPL; seit 1995 wirkt sie an der Planung von künftigen Marsmissionen mit. Gegenwärtig ist sie Programm-Managerin des Projekts »Mars Advanced SubSurface Access«.

Traité de mécanique céleste. Von François Félix Tisserand. Editions Jacques Gabay (Nachdruck 1990)

Himmelsmechanik. Von Manfred Schneider (4 Bände). Spektrum Akademischer Verlag, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Unser Schlaf-Wach-Rhythmus

Unsere heutigen Schlafgewohnheiten unterscheiden sich erheblich von denen in vorindustrieller Zeit. Den »honigschweren Tau des Schlummers« zu genießen, wozu Shakespeare in »Julius Caesar« aufforderte, besteht anscheinend kaum noch Gelegenheit – wir erstreben, arbeiten und erwarten immer mehr, vernachlässigen dabei den Schlaf. Die Nacht in Beschlag zu nehmen, hat unerwartete negative Folgen für die körperliche wie seelische Gesundheit. Wenn sich dies fortsetzt, dürften weite Teile unserer Gesellschaft einer unheilvollen Zukunft entgegensehen.



Auf den folgenden Seiten präsentieren wir einen übersetzten Originalbeitrag aus Nature Reviews Neuroscience, Bd. 6, Mai 2005, S. 399

Russell G. Foster und Katharina Wulff

Über Jahrhunderte wurde der Schlaf einfach als vorübergehendes Einstellen der Wachaktivität angesehen. Heute begreifen wir ihn als komplexe und hoch organisierte Abfolge physiologischer und verhaltensbiologischer Stadien und Prozesse. Im Durchschnitt verbringen wir etwa 30 Prozent unserer Lebenszeit schlafend, ohne viel Ahnung weshalb. Dieses Unwissen ist vermutlich der Hauptgrund dafür, dass unsere Gesellschaft den Schlummer so wenig achtet. Bestenfalls nehmen wir den Umstand, schlafen zu müssen, einfach hin. Schlimmstenfalls sehen wir in ihm ein Übel, das bekämpft werden muss. Diese Ansicht ist so gefährlich wie unhaltbar. Immunabwehr, kognitive Leistung und psychische Gesundheit werden durch Schlafen und unsere circadianen Rhythmen beeinflusst. Eine gestörte Schlaf-Wach-Schiene zieht ein breites Spektrum miteinander verquickter krankhafter Erscheinungen nach sich, darunter verminderte Vigilanz und Gedächtnisleistung, schlechtere geistige und körperliche Reaktionsfähigkeit sowie Motivationseinbußen, ferner Depressionen, Schlaflosigkeit, Stoffwechselfehlfunktionen, Adipositas, Abwehrschwäche und sogar ein erhöhtes Krebsrisiko. Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen diesen Problemen und wie unsere Gesellschaft ihr Leben in neuerer Zeit organisiert.[1] (Alle Indexzahlen verweisen auf die Referenzen in der Literaturliste, zu finden unter www.spektrum.de/schlaf.)

Mit der Einführung künstlicher Beleuchtung und der Umstrukturierung der Arbeitszeiten hat sich unsere Spezies zunehmend vom natürlichen Hell-Dunkel-Rhythmus abgekoppelt. Lange Arbeitszeiten und Schichtarbeit sowie die 24-stündige Verfügbarkeit von fast allem ließen den Schlaf in unserer Prioritätenliste zurückfallen. In einer Rund-um-die-Uhr-sieben-Tage-die-Woche-Gesellschaft mit ihrem neuen Wachheitsanspruch verlangen viele Arbeitgeber von ihrem Personal, im unnatürlichen Takt der Schicht zu arbeiten und zu jeder Tages- und Nachtzeit gleich leistungsfähig zu sein. Doch der von außen aufgezwungene Rhythmus kollidiert mit den Grundfesten unserer Biologie und ist alles andere als optimal für unsere Gesundheit. Um Müdigkeit und Schlaflosigkeit zu bekämpfen, geraten wir in einen Teufelskreis aus Stimulanzien und Beruhigungsmitteln. Tagsüber putscht man sich mit anregenden Substanzen wie Koffein und Nikotin auf, abends beruhigt man sich mit sedierenden Substanzen wie Schlafmitteln und Alkohol. Am nächsten Morgen sind dann wieder Stimulanzien vonnöten, um die Nachwirkungen von Sedativa und beeinträchtigtem Schlaf zu kompensieren. Zahlreiche Medikamente wurden eigens entwickelt, um Schlaf und Aufmerksamkeit zu manipulieren, um den Jetlag zu bekämpfen und um »metabolisch dominante« Soldaten zu schaffen – Krieger, die sieben Tage die Woche rund um die Uhr im Einsatz sein können.

Dieser Perspektiven-Artikel beleuchtet einige Ursachen und Folgen von ge-

Ihre Meinung zu diesem Zusatzangebot interessiert uns. Unsere Fragen und mehr zu diesem Artikel finden Sie unter www.spektrum.de/schlaf

störtem Schlaf und beeinträchtigter circadianer Rhythmik. Eine umfassende Darstellung ist hier nicht möglich. Vielmehr wollen wir die Bedeutung des Themas herausstellen und illustrieren, wie zahlreiche den Schlaf zerrüttende Faktoren zusammenwirken. Der Artikel soll zudem Diskussionsanstöße geben, wie sich diese Erkenntnisse nutzen ließen, um unsere Lebensgewohnheiten umzustellen. Abbildung 1 illustriert die Beziehungen zwischen Gesundheit, Leistungsfähigkeit, Schlaf und circadianen Rhythmen einerseits sowie endogenen und exogenen, also inneren und äußeren Einflüssen andererseits. Das Schema gibt den Rahmen für die folgende Diskussion vor und umreißt die zentrale Frage: Kann unsere Gesellschaft die zunehmenden Erkenntnisse zur gesundheitlichen Bedeutung von Schlaf und circadianen Rhythmen nutzen, um eine bessere Balance zwischen unserem biologisch bedingten Bedürfnis nach »Action« auf der einen und nach Ruhe auf der anderen Seite zu finden?

Grundlagen der Schlafbiologie

Schlaf ist ein hoch komplexer Zustand mit alternierenden Mustern neuraler Aktivität. Man unterscheidet hierbei REM-Schlaf (benannt nach der auftretenden raschen Augenbewegung, *rapid eye movement*) von vier Nicht-REM-, Non-REM-Stadien.[2] Ein einduselnder Mensch sinkt langsam schrittweise tiefer in den Schlaf, durchmisst dabei die vier Non-REM-Stadien. Anschließend flacht der Schlaf rasch wieder ab und geht in eine REM-Phase über, die durch eine weit gehende muskuläre Lähmung (motorische Atonie) gekennzeichnet ist. Mit Beginn des erneuten etappenförmigen Abstiegs ist ein Schlafzyklus abgeschlossen, der etwa 70 bis 90 Minuten dauert. Während eines durchschnittlichen Nachtschlafs können es fünf solcher Zyklen werden. Ohne äußere Weckreize erwacht man dann gewöhnlich aus einer REM-Phase.[2, 3]

Schlaf entsteht offenbar durch zwei weit gehend einander entgegenwirkende Mechanismen: das circadiane System, welches die Wachheit regelt, und das homöostatische Schlafbedürfnis. Über die circadiane innere Uhr wird praktisch jeder Aspekt unserer Physiologie und eben auch der Schlaf eingestellt. Unter natürlichen Umständen erleben wir einen 24-stündigen Hell-Dunkel-Zyklus, bei dem unser circadianes System den Wechsel am Morgen und Abend nutzt, um die biologische Zeit mit der Umweltzeit zu synchronisieren. Es dient dann zur Antizipation der wechselnden Erfordernisse des 24-Stunden-Tages und dazu, Physiologie und Verhalten vorab fein auf die sich regelmäßig wandelnden Bedingungen abzustimmen. Den Schlummer antizipierend sinken Körpertemperatur und Blutdruck, die Schlafneigung wächst. Vor dem Morgengrauen wiederum wird der Stoffwechsel hochgefahren in Erwartung der erhöhten Anforderungen nach dem Aufwachen. Das Koordinationszentrum, das diese circadianen Rhythmen generiert, befindet sich in einem beidseitig vorhandenen Hirnkern mit jeweils etwa 10 000 Neuronen im vorderen Hypothalamus. Er wird als suprachiasmati- ▷

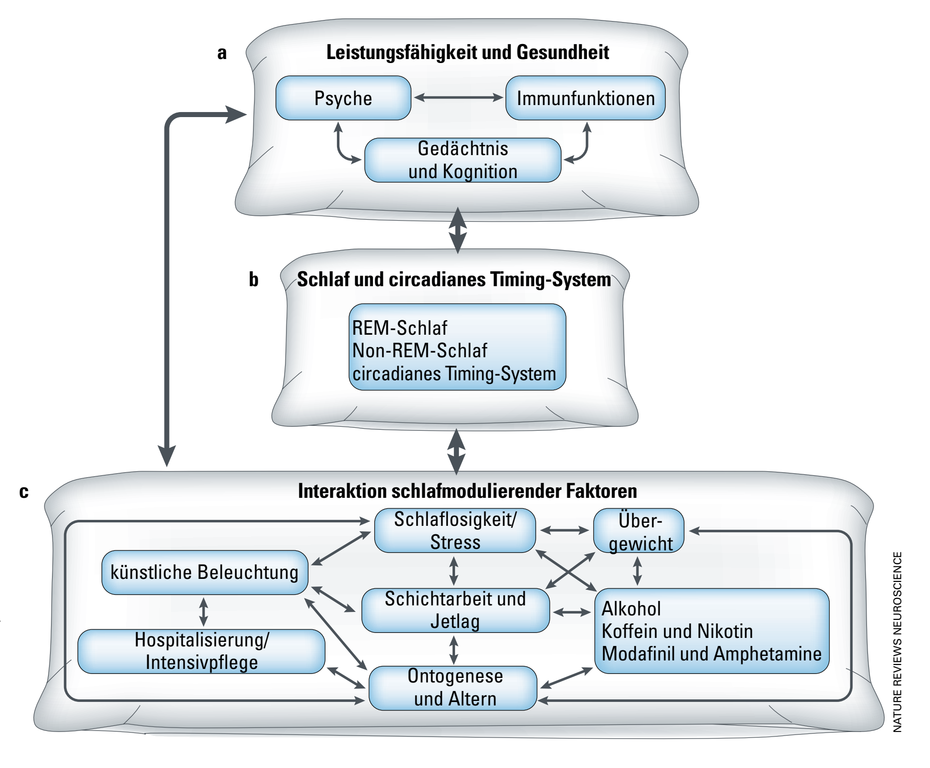


Abbildung 1: **Wechselseitige Beziehungen von Faktoren, die Schlaf, Gesundheit und Leistungsfähigkeit beeinflussen.** a) Die Interaktionen zwischen seelischer Gesundheit, Gedächtnis, Kognition und Immunfunktionen tragen zum Erhalt unserer Leistungsfähigkeit und Gesundheit bei. Psychische Probleme beispielsweise gehen oft mit beeinträchtigter Kognition und Immunabwehr einher[45, 118]. b) Das circadiane System ist entscheidend für die Konsolidierung und Synchronisation der Schlafphasen. REM- und Non-REM-Schlaf (REM = *rapid eye movement*, rasche Augenbewegungen) interagieren und formieren sich zu einer geordneten Abfolge von Stadien im Lauf der Nacht[119]. c) Komplexe Interaktionen bestehen zwischen verschiedenartigen Faktoren, die auf den ersten Blick nicht zusammenhängen. Die künstliche Beleuchtung am Arbeitsplatz zum Beispiel kann Stress erhöhen, der seinerseits metabolische Imbalancen fördern kann, die zu Übergewicht führen[62]. Stress begünstigt auch Alkoholkonsum, der zu Schlaflosigkeit und Übergewicht führen kann. Letzteres erzeugt mehr Stress und Schlaflosigkeit und begünstigt damit den wechselweisen Konsum von Stimulanzien und Sedativa[110, 112]. Diese Interaktionen werden alle vom Lebensalter beeinflusst[120]. Mit steigendem Alter nimmt außerdem die Wahrscheinlichkeit eines Krankenhausaufenthalts zu. Die dort oft abnorme Lichtexposition fördert Stress und Schlaflosigkeit[121, 122]. Die drei Faktorenkomplexe (a bis c) beeinflussen sich gegenseitig – entweder direkt oder indirekt (über das Schlafsystem und das circadiane Timing-System). So wirken sich Immunreaktionen (a) direkt auf Schlaf-Wach-Stadien aus (b), die wiederum zahlreiche Komponenten der Gruppe c beeinflussen. Veränderungen im Komplex c wirken zurück auf die Gruppen a und b.

▷ scher Nucleus (SCN) bezeichnet.[4] Circadiane und homöostatische Prozesse konsolidieren gemeinsam interaktiv den Schlaf.

Der homöostatische Antrieb (zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts, der Homöostase, zwischen Wachdauer und Schlafbedürfnis) beschreibt einen intuitiv erkennbaren Prozess, bei dem das Schlafbedürfnis mit der Dauer der Wachperiode zunimmt. Dabei kommt es zu wechselseitigen inhibitorischen Aktionen zwischen schlaf- und wachheitsfördernden Systemen. Neuronen, die Schlaf fördern, gibt es in der ventrolateralen präoptischen Region (VLPO) des Hypothalamus und im medianen präoptischen Nucleus (MnPn). Sie inhibieren über die Signalstoffe Gamma-Aminobuttersäure (englisches Kürzel GABA) und Galanin mutmaßlich wachheitsfördernde Neuronengruppen, die in verschiedenen Wachzentren des oberen Hirnstamms und Zwischenhirns vorkommen.[5, 6] Non-REM-Schlaf resultiert aus der Aktivierung von VLPO-Neuronen und der immer stärker nachlassenden Feuerrate von aminergen und cholinergen wachheitsfördernden Neuronen; dieser Rückgang ist wiederum auf die zunehmende Freisetzung von GABA zurückzuführen. Sowohl die Aktivierung von VLPO-Neuronen als auch die Abgabe von GABA steigt proportional zur Schlaftiefe an. Nach ausreichender Schlafdauer erwachen wir am Übergang zwischen Nacht und Tag zu einer vom circadianen System vorgegebenen Zeit. Dieses bestimmt das Timing von Schlafbedürfnis und Wachheit und wird oft als das wachheitsfördernde System definiert. Fällt es aus (zum Beispiel nach einer Schädigung des SCN), tritt Schlaf zwar weiterhin auf, dann jedoch in eine Folge kurzer Episoden fragmentiert, die allein durch den homöostatischen Antrieb gefördert werden.[9]

Bei Menschen und anderen tagaktiven Säugern dürften auch die Körperkerntemperatur und/oder die Konzentration von Melatonin (dem wichtigsten Hormon der Zirbeldrüse) für die Konsolidierung des Schlafs bedeutsam sein. Die Melatoninsynthese unterliegt circadianen Schwankungen. Ihr Rhythmus wird vom SCN aus über eine Bahn mit vielen synaptischen Schaltstellen in einer Weise reguliert, dass während eines 24-Stunden-Tags jeweils nachts Melatonin aus der Zirbeldrüse freigesetzt wird. Sein Spiegel im Blut steigt kurz nach Einbruch der Abenddämmerung rapide an und fällt bereits vor der Morgendämmerung wieder. Helles Licht bewirkt ebenfalls eine rasch eintretende Hemmung der Melatoninsynthese. Beim Menschen wird der Schlaf normalerweise in der Phase steigender Melatoninkonzentration und fallender Körperkerntemperatur eingeleitet.[10, 11] Versucht der Mensch jedoch umgekehrt, in der Phase fallender Melatoninkonzentration und steigender Körperkerntemperatur einzuschlafen, wie zum Beispiel nach einer Nachtschicht, ist der Schlummer meist kürzer und weniger fest.[12] Nimmt man während des Tags Melatonin ein, kann dies zu Schläfrigkeit und kognitiven Leistungseinbußen führen. Zahlreichen Experimenten

Menschen schneiden nach einer durchschlafenen Nacht in verschiedenen zuvor erlernten Aufgaben signifikant besser ab

zufolge können Menschen etwa 30 bis 120 Minuten nach der Einnahme von Melatonin (0,5 bis 5 Milligramm) schläfrig werden, nicht jedermann aber gleichermaßen. Bei nachtaktiven Nagetieren wirkt Melatonin erwartungsgemäß nicht schlaffördernd. Das Hormon lässt sich nutzen, um den menschlichen circadianen Rhythmus zu verschieben und einige der Symptome eines Jetlags zu mildern.[10, 13] In diesem Zusammenhang ist von Interesse, dass der suprachiasmatische Nucleus geballt Rezeptoren für Melatonin enthält und dass das Hormon die neuroelektrische Aktivität des SCN in der Morgen- und Abenddämmerung besonders effektiv unterdrückt.[14] Zu anderen Tageszeiten modulieren hingegen Neuropeptide wie PACAP (nach englisch *pituitary adenylate cyclase activating polypeptide*; es aktiviert das Enzym Adenylatcyclase in der Hypophyse) und VIP (vasoaktives intestinales Peptid) über ihre Rezeptoren PAC1 und VPAC2 die neuronale Aktivität des SCN.[15]

Die Notwendigkeit von Schlaf

Alle Säugetiere, auch die Eier legenden wie Schnabeltier und Ameisenigel, zeigen Schlafmuster mit REM und Non-REM-Phasen.[16, 17] Daher war in der Entwicklung der Säuger wahrscheinlich die Grobstruktur unseres Musters bereits vor mindestens 120 Millionen Jahren vorhanden; vermutlich ist sie sogar wesentlich älter.[18] Die Frage, warum wir schlafen, ist noch immer nicht völlig geklärt, wenn auch vielfältige Vorschläge existieren.[19] Zweifellos unterstützte dieser dürftige Kenntnisstand die Geringschätzung des Schlafs in unserer Gesellschaft, und es bleibt nur zu hoffen, dass sich diese Haltung mit fortschreitendem Wissen über die essenzielle Funktion des Schlummers wandelt.

Schlaf und kognitive Funktionen. Studien an Mensch und Tier verweisen auf einen engen Zusammenhang zwischen Schlaf und der Bearbeitung von Gedächtnisinhalten, der so genannten schlafabhängigen Gedächtnisprozessierung. Bei zahlreichen tierexperimentellen Untersuchungen beeinträchtigte ein Schlafentzug nach Lernaufgaben die Leistung in nachfolgenden Tests. Die frühen Versuche auf diesem Gebiet liefen ohne adäquate Kontrollgruppen für Schlafentzug; daher ließ sich nicht ausschließen, dass das schlechtere Abschneiden lediglich auf reduzierter Aufmerksamkeit beruhte. Neuere Studien mit solchen Kontrollen erbrachten jedoch eindeutig eine starke Korrelation zwischen dem Schlaf und der Festigung von Gedächtnisinhalten. Menschen schneiden nach einer durchschlafenen Nacht bei verschiedenen zuvor erlernten Aufgaben signifikant besser ab.[20, 21] Die selektive Unterbrechung des REM-Schlafs, nicht jedoch die von Non-REM-Phasen, macht diesen Leistungszuwachs zunichte.[22] In eingehenderen Studien wurden selektiv der Tiefschlaf – und zwar die Non-REM-Stadien 3 und 4 mit den langsamen, niederfrequenten Wellen im Hirnstrombild – oder die REM-Phasen unterbrochen. Die Schlussfolgerung aus den Ergebnissen lautete, dass die Gedächtniskonsolidierung in den Non-REM-Phasen beginnt und sich dann in den REM-Phasen verstärkt fortsetzt.[23] Falls die Hypothese der schlafabhängigen Prozessierung von Gedächtnisinhalten zutrifft – der nicht alle Wissenschaftler zustimmen[24] –, dann beruht das Ganze auf strukturellen und funktionellen Veränderungen in Neuronen des Gehirns.[25] Daraus darf man, wenn auch erst vorläufig, schließen, dass gestörter Schlaf unter anderem die Mechanismen der Hirnplastizität beeinträchtigt, die mit Lernen und Gedächtnis assoziiert sind.

Die Dauer des Nachtschlafs unter Menschen weist eine glockenförmige sta-



tistische Verteilung auf. Der Mittelwert liegt bei 7,0 bis 7,9 Stunden.[26–28] Manche Personen schlafen jedoch erheblich weniger. Wird die Schlafdauer eine Woche lang auf 3 bis 5 Stunden pro Nacht reduziert, nehmen Vigilanz und Leistung mit der Dosis ab.[29] Wird der Nachtschlummer nach einem kumulativen Schlafentzug sukzessive verlängert, steigt die Leistungsfähigkeit entsprechend wieder an. Interessanterweise scheinen die ersten Stunden Schlaf für die Erholung am wichtigsten zu sein.[30] Dies könnte erklären, weshalb Versuchspersonen selbst nach kurzen Nickerchen von nur 10 Minuten Dauer sich wacher und frischer fühlen,[31, 32] und weshalb ein Mittagsschlaf von 60 bis 90 Minuten, der aus Tiefschlaf- und REM-Anteilen besteht, die Leistungsfähigkeit auf ein Niveau anhebt, wie es nach einem normalen Nachtschlaf beobachtet wird.[33] Der Annahme jedoch, das menschliche Gehirn könne sich an längerfristig wenige Stunden Nachtschlaf adaptieren, widersprechen Experimente mit systematischer chronischer Schlafrestriktion. Dabei zeigte sich eine deutlich verminderte kognitive Leistungsfähigkeit. Interessanterweise waren sich die Probanden dieser Leistungseinbußen kaum bewusst.[34,35] Menschen mit unzureichendem Schlaf können also das Ausmaß ihrer Beeinträchtigungen nicht realistisch einschätzen.

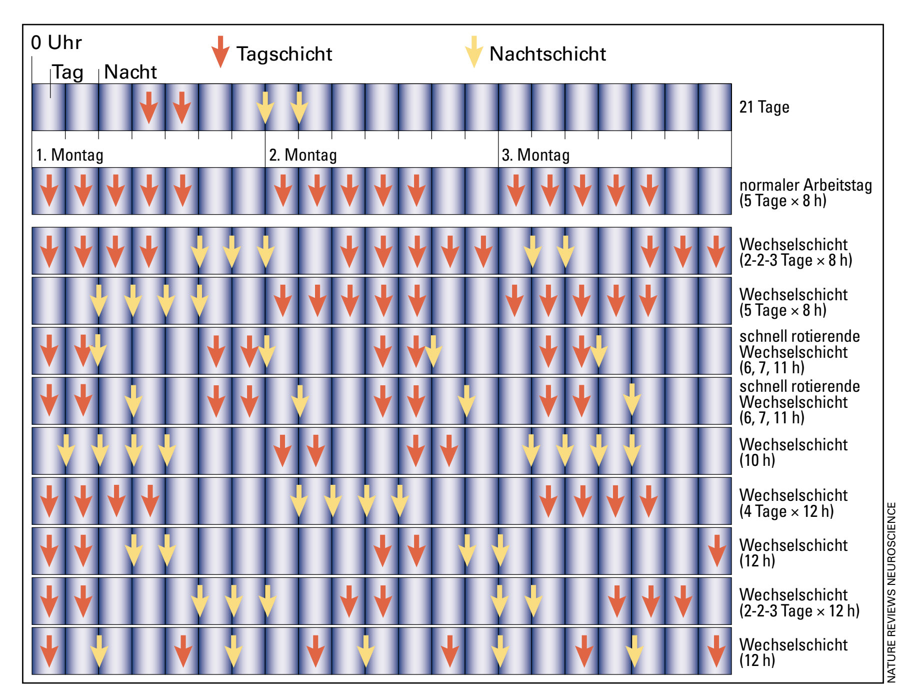


Abbildung 2: **Europäische Schichtpläne. Die Abbildung illustriert die Vielfalt der Schichtsysteme, die gegenwärtig in Europa im Einsatz sind. Schlüssige Belege, welchem davon der Vorzug zu geben ist, fehlen. Doch ist ausgiebig belegt, dass sich ein langer Arbeitstag (9–12 Stunden) und Nachtarbeit ungünstig auswirken[84]. Das Diagramm zeigt oben das Prinzip: einen Zeitraum von drei Wochen mit Tag und Nacht, beginnend mit einem Montag, wobei die Pfeile jeweils für Tag- (rot) oder Nachtschichten (gelb) stehen. Die zweite Zeile zeigt einen normalen Arbeitsrhythmus mit einer 5-Tage-Woche bei 8 Stunden tagsüber. Wenn auch vorwärtsrotierende Schichtsysteme (Früh- auf Spät- auf Nachtschicht) den Beschäftigten offenbar mehr Schlaf ermöglichen als rückwärtsrotierende Schemata (Früh- auf Nacht- auf Spätschicht), erlauben sie doch keine Adaptation des circadianen Systems. Die Zeilen 3–11 zeigen Beispiele für verschiedene Schichtsysteme mit rotierenden, schnell rotierenden und kontinuierlichen Schemata[123–125].**

Schlaf und Immunfunktion. Die Beeinträchtigungen der kognitiven Leistungsfähigkeit sind zwar auffällig, doch möglicherweise nur die Spitze des Eisbergs, was die gesundheitlichen Folgen anbelangt. Die Indizien mehren sich für eine komplexe und bedeutende Wechselwirkung zwischen Schlaf und Immunsystem: Unterbrochener oder mangelnder Schlaf scheint die Funktion der Abwehr zu beeinträchtigen, und umgekehrt kann die Immunantwort auf eine Infektion das Schlafmuster verändern. Ratten, die man anhaltend am Schlafen hindert, sterben leicht an einer Sepsis (bei der Bakterien stark ins Blut übertreten),[36] und beim Menschen geht die Aktivität der Natürlichen Killerzellen nach nur einer durchwachten Nacht um bis zu 28 Prozent zurück.[37] Fehlender Schlaf beeinträchtigt auch viele andere Aspekte unseres Immunsytems, darunter zirkulierende Immunkomplexe, sekundäre Antikörperreaktionen und die zelluläre Antigenaufnahme.[38, 39] Entzündungsfördernde Cytokine begünstigen interessanterweise den Tiefschlaf, während entzündungshemmende Cytokine den Non-REM-Schlaf inhibieren. Diese Interaktionen laufen offenbar über GHRH (das Freisetzungshormon des Wachtumshormons, *growth hormone-releasing hormone*), Prolactin und VIP.[40]

Ein wichtiges Bindeglied zwischen Immunsystem, Schlaf und psychischem Stress ist Cortisol. Schlafentzug und psychische Belastungen erhöhen die Konzentrationen des Hormons im Blut. Eine durchwachte Nacht kann den am folgenden Abend gemessenen Cortisolspiegel im Blut tatsächlich um fast 50 Prozent erhöhen.[41] Hohe Cortisolspiegel unterdrücken die Immunabwehr, sodass übermüdete Menschen krankheitsanfälliger werden. Bestimmte Krebsarten treten bei Nachschichtarbeitern gehäuft auf; über die Gründe wird viel spekuliert.[42–44] Angesichts des erheblichen Stresses und Schlafmangels, der mit Nachtarbeit verbunden ist, erscheint jedoch eine Beeinträchtigung des Immunsystems als die wahrscheinlichste aller vorgeschlagenen Erklärungen.

Schlaf und seelische Gesundheit. Psychische Erkrankungen gehen meist mit Schlafstörungen einher, wobei die verantwortlichen Mechanismen unklar sind. Durchschlafstörungen und frühmorgendliches Erwachen gehören zu den typischen Symptomen einer echten Depression, die innerhalb der Bevölkerung etwa 20 Prozent aller Menschen im Lauf ihres Lebens trifft.[45, 46] Von den Patienten, die anscheinend vollständig auf ihre Medikamente ansprechen, klagen 44 Prozent weiterhin über Schlafstörungen,[47] die übrigens ein deutlicher prognostischer Faktor für drohende Rückfälle unter antidepressiver Medikation sind.[48] Depressionen werden häufig von Angststörungen begleitet, die ebenfalls in en- ▷

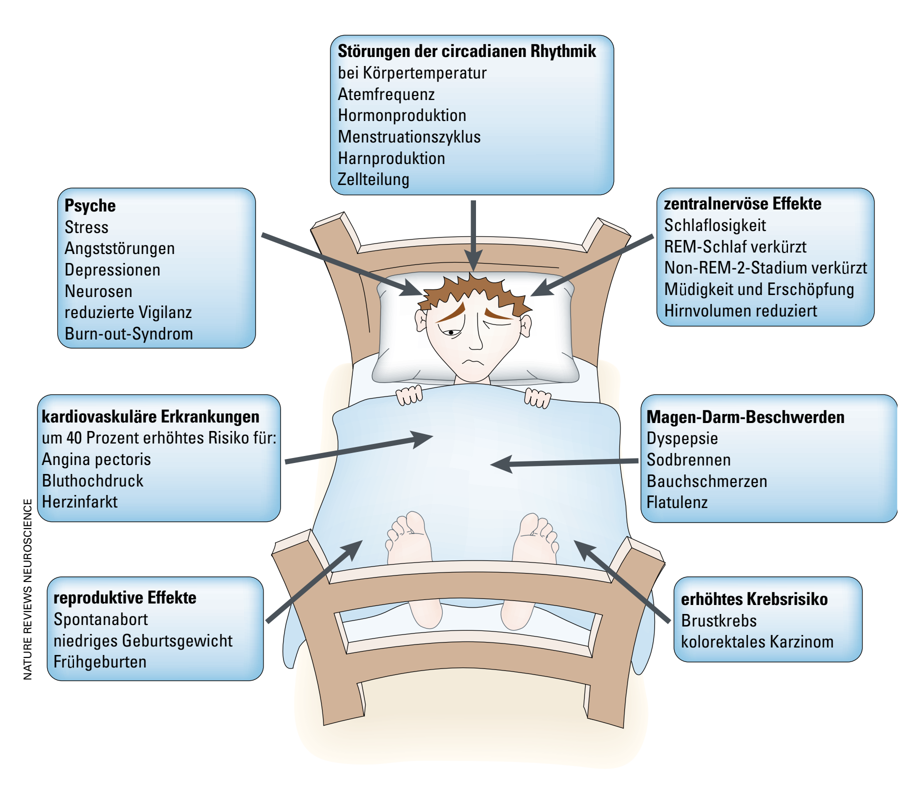


Abbildung 3: **Gesundheitsprobleme bei Schichtarbeitern.** Die Zeichnung veranschaulicht die vielfältigen physiologischen und psychischen Probleme, die durch den gestörten Schlafrhythmus bei dauernder Schichtarbeit auftreten können. Weiterführende Informationen siehe die Referenzen 43, 72–75, 126 und 127 der Literaturliste (www.spektrum.de/schlaf).

ger Beziehung zu chronischen Schlafstörungen stehen. Starke Angst beeinträchtigt außer dem Schlaf oft auch die Lebensfreude, Arbeitsfähigkeit und sozialen Beziehungen. Panikattacken, posttraumatisches Stresssyndrom, generalisierte Angststörungen und soziale Phobien, allesamt mit Angst verbunden, gehen gleichfalls häufig mit Schlafstörungen und Schlafmangel einher. Eine Populationsstudie in mehreren europäischen Ländern ergab einen Zusammenhang zwischen Angst und Schlaflosigkeit bei 47 Prozent der Patienten, die eine psychiatrische Erkrankung hatten.[49]

Man kennt mehrere Neuropeptid-Systeme, die sich breit auf Schlaf, Depression und Angst auswirken. Das Neuropeptid Y (NPY) beispielsweise – das in vielen Hirnregionen (darunter Locus coeruleus, Hypothalamus, Hippocampus, Nucleus accumbens, Amygdala und Neocortex) exprimiert wird – ist mit einer Verkürzung der Einschlafphase assoziiert und mit anxiolytischen und antidepressiven Effekten.[50] Galanin scheint auch Schlaf zu fördern und Angst zu lösen (es kommt im Hypothalmus, Hippocampus und in der Amygdala vor sowie zusammen mit Noradrenalin in Neuronen des Locus coeruleus und mit Serotonin in Neuronen des dorsalen Raphekerns).[50, 51] Das Neuropeptid S (NPS) hingegen macht wach, mindert aber paradoxerweise die Angst und ähnelt in dieser Hinsicht Nikotin.[53] Diese Neuropeptide und/oder entsprechende pharmakologische Analoga sind möglicherweise als neue Mittel bei Schlafstörungen und psychischen Erkrankungen einsetzbar.

Schlafentzug und Schichtarbeit

Die Einführung von Elektrizität und künstlicher Beleuchtung im 19. Jahrhundert und die folgende Umstrukturierung der Arbeitszeiten haben uns immer stärker von den natürlichen tagesperiodischen Zyklen von Licht und Temperatur entkoppelt. Die Menschen schlafen heute vermutlich weniger als jemals zuvor in ihrer Geschichte. Über die Effekte von Schlafmangel wurde viel geschrieben. Allgemein gesagt, wer anhaltend übermäßig lange wach bleibt, zeigt Leistungseinbußen, darunter erhöhte Fehleranfälligkeit, verminderte Vigilanz, schlechteres Gedächtnis, verlängert mentale und physische Reaktionszeiten sowie Motivationsverlust.[2, 53, 54] Unzureichender Schlaf kostet die US-Wirtschaft schätzungsweise 150 Milliarden Dollar jährlich, da er Stress erhöht und die Produktivität am Arbeitsplatz vermindert, wobei Frauen etwa eineinhalbmal häufiger betroffen sind als Männer.[55]

27 Stunden ohne Schlaf beeinträchtigen die kognitive Leistungsfähigkeit stärker als 0,85 Promille Alkohol im Blut; dieser Wert liegt über den Grenzen, die viele Länder den Autofahrern erlauben.[56] Schlafentzug geht zudem mit einer Reihe abnormer Stoffwechselveränderungen einher[57] – besonders empfindlich reagiert der Glucose-Metabolismus[58] und das Tagesprofil der Plasmakonzentration von Leptin.[59] In einer Studie erhielten junge männliche Probanden, die 6 Nächte lang jeweils nur 4 Stunden schlafen durften, eine kohlehydratreiche Mahlzeit. Ihr Blutzuckerspiegel brauchte 40 Prozent länger zum Einregeln und ihr Insulinspiegel entsprach dem in den Frühstadien eines Diabetes mellitus. Ein zwölfstündiger Schlummer normalisierte dann das Ganze wieder. Daraus schlossen die Autoren der Studie, dass fortgesetzter Schlafmangel möglicherweise zur Entstehung von chronischen Leiden wie Diabetes mellitus, Adipositas und Bluthochdruck beiträgt.[60–62] Schlafmangel und Adipositas könnten vielleicht über Leptin und Ghrelin miteinander verknüpft sein – Hormone, die den Körperfettanteil regulieren.[57, 63] Fettleibigkeit ist wiederum eng mit einer Schlafapnoe korreliert, und damit weiteren Schlafstörungen.[64] Dann kann sich oft ein Teufelskreis aus Adipositas und Schlafstörungen aufschaukeln.

Eine aktuelle Erhebung zu den Schlafgewohnheiten von Menschen aller Altersgruppen zeigte in der Adoleszenz eine auffällige Verschiebung der Schlafenszeiten, die vom circadianen Schlaf-Wach-System gesteuert werden dürften.[65] Wahrscheinlich wirkt es aber nicht allein. Auch externe Faktoren wie zunehmende Selbstständigkeit, soziale Aktivitäten, vermehrter Zugang zu abendlicher Unterhaltung (Fernsehen im Schlafzimmer, Computerspiele und Internet) sowie Prüfungsvorbereitungen tragen dazu bei, dass Heranwachsende später zu Bett gehen und später aufstehen. Zahlreiche Jugendliche schlafen daher unter der Woche viel zu wenig, bleiben dafür am

Wochenende lange liegen und verschlafen morgens häufig. Das Ausmaß ihrer Tagesmüdigkeit ist vergleichbar mit der extremen Müdigkeit infolge einer Schlafapnoe.

Ähnlich wie Schichtarbeiter neigen die müden Teenager verstärkt dazu, ihre Schläfrigkeit mit Aufputschpillen, Nikotin oder Koffein zu bekämpfen. Junge Menschen sind im Übrigen die bedeutendste Risikogruppe für Autounfälle durch Übermüdung und Einschlafen am Steuer.[66] Obwohl zahlreiche Publikationen Zusammenhänge zwischen spätem Einschlafen und starkem Schlafmangel mit Konzentrationsstörungen und psychischen Auffälligkeiten belegen, finden diese Erkenntnisse bei den Zeitplänen, nach denen sich Jugendliche im Alltag richten müssen, kaum Berücksichtigung. Mehrere Studien sprechen ebenfalls dafür, dass eine Veränderung angebracht ist; bei einem späteren morgendlichen Schulbeginn besserten sich Aufmerksamkeit und Leistungsfähigkeit tagsüber.[67, 68]

Besonders auffällig sind Schlafmangel und Schlafstörungen bei Nachtschichtarbeitern. Mehr als 20 Prozent der Erwerbstätigen arbeiten zumindest ein Stück vor 7 Uhr oder ein Stück nach 19 Uhr.[69] Die Einführung der modernen Arbeitsschichten in den 1970er Jahren ermöglichte die Reduktion der wöchentlichen Arbeitszeit von 42 auf 38 oder gar 36 Stunden. Dies schuf mehr Raum für Erholung und Freizeitaktivitäten,[70] forderte aber einen hohen Preis.[71] Josephine Arendt von der Universität Surrey bringt es auf den Punkt: »Weil bei Schichtarbeitern die Hell-Dunkel-Exposition und das Aktivitäts-Ruhe-Verhalten rasch wechseln und in Konflikt geraten, kann sich eine Art Jetlag-Symptomatik entwickeln. Während Flugreisende sich normalerweise an den Tag-Nacht-Rhythmus der neuen Zeitzone gewöhnen, leben Schichtarbeiter gewöhnlich nicht in Phase mit den lokalen Zeitgebern.« Selbst nach zwanzig Jahren Nachtschicht verschieben sich ihre circadianen Rhythmen normalerweise nicht entsprechend den Anforderungen ihres Arbeitsrhythmus.[7]

Die fehlende Adaptation war ein wichtiger Anreiz, besser verträgliche Schichtsysteme zu entwickeln. Trotz aller Vielfalt und Komplexität der bisher erprobten Schemata (Abb. 2) ist es bisher nicht gelungen, die circadianen Probleme bei Schichtarbeit völlig zu vermeiden. Stoffwechsel, Aufmerksamkeit und Leistungsfähigkeit bleiben trotz allem tagsüber, wenn der Nachtarbeiter zu schlafen versucht, hoch und nachts, wenn er arbeiten muss, niedrig. Eine solch asynchrone Physiologie gepaart mit dürftigem Schlaf geht einher mit mehr Todesfällen durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, einem achtfach höherem Risiko für Magengeschwüre und einer stärkeren Anfälligkeit für manche Krebsarten.[72–75] Zu den weiteren Problemen gehören ein erhöhtes Unfallrisiko,[76] chronische Ermüdung, starke Schläfrigkeit, Einschlafschwierigkeiten, häufigerer Missbrauch von Suchtstoffen sowie öfter Depressionen. Auch empfinden viel mehr Nachtarbeiter ihre Tätigkeit als extrem belastend[77] (Abb. 3).

Warum aber stellt die Helligkeit am nächtlichen Arbeitsplatz die inneren Uhren nicht um? Das liegt am circadianen System: Das helle natürliche Sonnenlicht ist das bessere »Tag-Signal« als die übliche schwache künstliche Beleuchtung am nächtlichen Arbeitsplatz. Starkes Tageslicht auf dem Arbeitsweg oder in den übrigen hellen Stunden verhindert daher normalerweise, dass die Nachtbeleuchtung als Taktgeber wirkt. Fehlt allerdings jegliches natürliches Licht, reagiert die innere Uhr schließlich doch auf die künstliche Beleuchtung. Diese Tatsache könnte in der Praxis genutzt werden, um den Problemen der Nachtarbeit zu begegnen. Die meisten Nachtarbeiter vermeiden jedoch lieber eine Adaptation an ihren gegenphasigen Schlafrhythmus, um ihre Freizeit möglichst hellwach mit Familie und Freunden verbringen zu können.[70, 78–80] Ein möglicher Kompromiss wäre eine partielle Adaptation,[81] doch verliefe die wahrscheinlich nicht bei allen Nachtarbeitern gleich. »Abendtypen«, die von Natur aus zu später Stunde wacher sind, eignen sich besser für die Nachtschicht, während »Morgentypen« sich gewöhnlich leichter auf die Frühschicht einstellen.[82] Also könnte man Personen in Zukunft nach ihren Schlafgewohnheiten fragen und ihnen dann entsprechende Schichtpläne zuteilen.[82] Angesichts des erholsamen Effekts eines 60- bis 90-minütigen Schläfchens ist es erstaunlich, dass noch nicht öfter versucht wurde, solche Schlafpausen in die Schichtpläne einzubauen.[33]

Die Besorgnis erregenden Konsequenzen fehlenden Schlafs belegen auch mehrere Studien an amerikanischen Medizinstudenten im ersten Jahr ihrer Kliniktätigkeit nach dem ersten Abschluss.[8397–85] Sie hatten eine Wochenarbeitszeit von 70 bis 80 Stunden und viermal im Monat eine Schicht von 32 Stunden. Erstaunlicherweise ist diese enorme Arbeitsbelastung von der amerikanischen Association of Medical Colleges gegenwärtig zugelassen.[84–86] Die Studenten hatten ein um 16,2 Prozent höheres Risiko für Verkehrsunfälle auf dem Heimweg und machten erheblich mehr Flüchtigkeitsfehlern, wenn sie über Nacht auf der Intensivstation arbeiteten. Nachdem die Wochenarbeitszeit auf 63 Stunden und die Schichtdauer auf maximal 16 Stunden reduziert wurde, sank diese Fehlerrate unter die Hälfte. Diese Beispiele veranschaulichen die Folgen langer Arbeitszeiten und langer Schichten für Gesundheit und Sicherheit. Offensichtlich sind rechtsverbindliche Regelungen hinsichtlich der Arbeitsstunden in allen Bereichen der Gesellschaft nötig, darunter auch dem öffentlichen Transportwesen und dem Ausbildungssektor.[1] Zu den möglichen Warnzeichen für eine Übermüdung am Steuer gehören okulomotorische Beeinträchtigungen. So nimmt die Geschwindigkeit der Sakkaden, der springenden Augenbewegungen, bei partiellem Schlafentzug deutlich ab und korreliert mit der schlechteren Fahrtüchtigkeit.[87]

Etwa 20 Prozent der Bevölkerung leiden unter Schlaflosigkeit. Am häufigsten betroffen sind Rentner, Frauen, Arbeitslose und Büroangestellte.[88, 89] Sie können nur schwer einschlafen (brauchen dazu über 45 Minuten), schlafen nicht durch, werden morgens oft viel zu früh wach. Das macht sie extrem müde am nächsten Tag. Bei einigen betroffenen Personen sind im Elektroencephalogramm (EEG) Störungen in den Phasen von Non-REM- und REM-Schlaf nachweisbar, bei anderen aber ist das Schlaf-EEG normal.[90] Schlaflosigkeit wurde lange ausschließlich als ein Symptom interpretiert, wird jedoch heute häufiger als ein Syndrom betrachtet, dem unterschiedliche Ursachen zu Grunde liegen, die zu jeweils spezifischen Störungen führen. Die regelmäßigste Folge der Schlaflosigkeit ist ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer Depression. Die Ursachen der Schlaflosigkeit sind alles andere als klar, doch die Hinweise auf eine Beteiligung sowohl der Wach- als auch der Schlafsysteme des Gehirns mehren sich, und es wird irgendeine Form von »Hyper-Arousal« (eine Art überhöhter Erregungszustand) als möglicher Mechanismus diskutiert. Bei Patienten, die an Schlaflosigkeit leiden, ist die Stoffwechselaktivität im Gehirn so- ▷

▷ wohl während der Wachperiode als auch im Non-REM-Schlaf erhöht. Ihre Einschlafschwierigkeiten könnten damit zusammenhängen, dass ihr Gehirn die Aktivität von Arousal-Mechanismen beim Übergang von Wachen zu Schlafen nicht herabregulieren kann.[91, 92] Das Neuroimaging des Gehirns ermöglicht eine objektive Analyse von Schlafstörungen und Verhalten.[93–96] Bei der primären Insomnie ergaben diese bildgebenden Verfahren erstaunlicherweise eine vorübergehende hypo- statt einer hypermetabolen Aktivität,[97] was auf homöostatische Imbalancen beim Schlaf schließen lässt.

Kulturdrogen, die Schlaf modulieren

In allen menschlichen Gesellschaften – nicht nur in den modernen Industrienationen – sind weithin Mittel in Gebrauch, die Schlaf und Aufmerksamkeit beeinflussen. Für Milliarden von Menschen gehört der zyklische Konsum von Stimulanzien und Sedativa zum typischen Alltag, was angesichts des allgemeinen Schlafmangels wohl kaum verwundert.[98] Amphetamine und Kokain dienten in aller Welt als Aufputschmittel, bevor sie als suchterzeugend erkannt und in den 1950er Jahren verboten wurden. Heute sind die meistkonsumierten Stimulanzien Koffein und Nikotin, während Alkohol häufig als Sedativum eingesetzt wird, um deren Effekte wieder umzukehren. Nie zuvor wurden größere Mengen dieser anregenden Drogen verbraucht, doch könnten synthetische Stimulanzien wie Modafinil (Provigil, Cephalon) schon bald an ihre Stelle als »Heilmittel gegen den Schlaf« treten.

Eine Tasse Kaffee oder Tee am Morgen ist für hunderte Millionen Menschen unverzichtbar für den Start in den Tag. Erwachsene wie auch Jugendliche konsumieren aber auch tagsüber koffeinhaltige Getränke. Deren Gehalt an Koffein ist in der Tabelle aufgelistet. Seine anregende Wirkung setzt nach 15 bis 30 Minuten ein. Es beeinflusst Leistung, Lernen, Gedächtnis und Muskelkraft, während es allgemeine Müdigkeit mindert. Der REM-Schlaf wird vorverlegt, der Tiefschlaf insgesamt verkürzt und fester Schlaf gestört. Wie schnell der Organismus Koffein abbaut, ist individuell sehr verschieden: Die Halbwertszeit liegt zwischen 3 und 7 Stunden, im Durchschnitt bei 4 Stunden. Nach einer Tasse Kaffee am Nachmittag können also beim Zubettgehen noch wirksame Mengen Koffein im Blut vorhanden sein, was das Einschlafen verzögert. Seine Wirkung dürfte das Stimulans entfalten, indem es kompetitiv einen Subtyp des Adenosinrezeptors besetzt und dadurch die körpereigene Substanz Adenosin hindert, seine stimmungsdrückenden und schlaffördernden Effekte zu entfalten.[99] Verglichen mit Nikotin ist das Suchtpotenzial zwar gering, ein weltweiter Verkauf von über 600 000 Tonnen Kaffeebohnen jährlich illustriert jedoch, in welchem Ausmaß die Menschheit von dem Stimulans abhängig ist. Nach Rohöl sind Kaffeebohnen die umsatzstärkste Handelsware auf dem freien Markt.

Nikotin, als häufiger Begleiter zum Kaffee, wurde etwa zeitgleich wie Koffein zur Volksdroge.[100] Warnhinweise und Aufklärungskampagnen zu den Gefahren des Rauchens und das Wissen um zahllose Todesfälle bringen uns nicht davon ab. Dies dürfte zum Teil daran liegen, dass Nikotin oft deutlich die kognitive Leistungsfähigkeit verbessert, indem es die Wirkung des Neurotransmitters Acetylcholin imitiert.[101] Der Anteil der Raucher ist unter Nachtarbeitern (zum Beispiel Pflegepersonal in Krankenhäusern)[102] besonders hoch, vermutlich weil nach Schlafentzug Raucher ihren nicht rauchenden Kollegen überlegen sind, gemessen an kognitiven Fähigkeiten wie Aufmerksamkeit, Hand-Auge-Koordination, Konzentration, Reaktionszeit und Kurzzeitgedächtnis.[103] Auch Langzeitgedächtnis und Lernleistungen werden durch Nikotin anscheinend verbessert.[104] Angesichts dieser anregenden Effekte ist es plausibel, dass Nikotin sowohl die Dauer als auch die Qualität des Schlafs beeinträchtigt. Raucher konsumieren außerdem gewöhnlich mehr koffeinhaltige Getränke.[105, 106]

Alkoholisches wird oft als Schlaftrunk konsumiert. Die Effekte auf das Gehirn variieren, betreffen jedoch im Allgemeinen die Systeme von vier verschiedenen Neurotransmittern: Glutamat, GABA, Dopamin und Serotonin.[107] Eine US-Studie aus den 1990er Jahren ergab, dass 13 Prozent der Befragten im vorangegangenen Jahr Alkohol als Einschlafhilfe verwendet hatten, verglichen mit 18 Prozent, die Schlafmittel schluckten und 5 Prozent, die beides nahmen.[108] In Ländern mit weniger strengen Reglementierungen des Alkoholkonsums, wie in etlichen europäischen, ist diese Zahl vermutlich noch höher. Alkohol kann zwar beim Einschlafen helfen, beeinträchtigt aber bestimmte Aspekte des Schlafs, insbesondere dessen Gesamtdauer sowie den Anteil des REM-Schlafs in der zweiten Nachthälfte. Zudem verschlimmert er die Tagesmüdigkeit. Bei regelmäßigem Alkoholkonsum entwickelt sich eine Toleranz gegenüber der sedierenden Wirkung, und es werden immer größere Mengen benötigt, um den gleichen Effekt zu erzielen. Beim Übergang in den Missbrauch zeigt sich

Tabelle: **Koffeingehalt verschiedener Getränke, Nahrungsmittel und Medikamente**

Getränk, Nahrungsmittel, Medikament	Koffeingehalt (mg)*
Sprite, Fanta (360 ml)	0
entkoffeinierter Kaffee (240 ml)	1–5
Milchschokolade (28 g)	6
grüner Tee (240 ml)	15–20
Bitterschokolade (28 g)	20
Pepsi Cola (360 ml)	38
Dr. Pepper (360 ml)	40
Coca-Cola (360 ml)	46
Schwarztee (240 ml)	40–60
Espresso (60 ml)	50–120
Red Bull (240 ml)	80
Instantkaffee (240 ml)	65–100
aufgebrühter Kaffee (240 ml)	80–135
Filterkaffee (240 ml)	115–175
Koffeintabletten (Durchschnitt)	200

*Daten der Food and Drug Administration (FDA) der USA

Schlaflosigkeit als eine der auffälligsten Nebenwirkungen.[109] Eine aktuelle Studie ergab, dass 61 Prozent der Alkoholiker, die mit einem Entzugsprogramm begannen, in den letzten sechs Monaten unter Schlaflosigkeit litten. Selbst zwei Jahre nach dem letzten Tropfen können noch abnorme Schlafmuster bestehen bleiben. Die muskelentspannende Wirkung des Alkohols lässt die oberen Atemwege partiell kollabieren und erschwert dadurch das Atmen. In ausgeprägten Fällen sind Schlafapnoe und damit weitere Schlafstörungen die Folge.[110]

Für militärische Zwecke wird schon seit Längerem daran geforscht, den »metabolisch dominanten« Soldaten zu schaffen, der rund um die Uhr sieben Tage die Woche ohne Ruhepause kämpfen kann. Das Schlafbedürfnis zu eliminieren und gleichzeitig einen hohen Grad an körperlicher und geistiger Leistungsfähigkeit zu erhalten, gilt als fortschrittliches Ziel moderner Kriegsführung. Infanteristen, Schiffsbesatzungen und Flugzeugpiloten müssen in der Lage sein, rasche Entscheidungen auf der Grundlage teils unzureichender Informationen zu treffen. Schon ein geringes Nachlassen der geistigen Leistungsfähigkeit kann den Tod bedeuten,[4] was unter anderem erklärt, warum Flugbesatzungen der US-Airforce regelmäßig Amphetamine einnehmen.[111] Diese Substanzgruppe verursacht allerdings eine Reihe von Nebenwirkungen wie Erregungszustände, Reizbarkeit, Übelkeit und Impotenz. Mit nachlassender Wirkung kommt es auch häufig zu Rebound-Effekten, die mit extremer Erschöpfung und Depressionen einhergehen.[112]

Das Pharmakon Modafinil hingegen gehört zu den so genannten Eugeroika (»guten Wachmachern«)[111], die Wachheit wie auch Vigilanz fördern. Die französische Regierung gestattete den Soldaten der Fremdenlegion bereits im ersten Golfkrieg, bei verdeckten Operationen Modafinil einzunehmen. Auch die amerikanischen Streitkräfte setzen große Hoffnungen darauf.[113] Unveröffentlichten Untersuchungen zufolge vermag Modafinil merklich den subjektiven Wachheitsgrad und die kognitive Leistungsfähigkeit nach 24-stündigem Schlafentzug zu erhöhen, allerdings nicht im gleichen Umfang wie eine Nacht Schlaf (C. Czeisler, persönliche Mitteilung). Sein Wirkmechanismus ist noch nicht aufgeklärt.[114, 115] Jedoch erweist sich die Substanz auch bei einer Reihe von Erkrankungen, die mit Beeinträchtigungen der kognitiven Leistung einhergehen, als klinisch nützlich – unter anderem bei Narkolepsie, Alzheimer-Krankheit, Depression und Aufmerksamkeitsstörung.[116, 117] Polizisten, medizinisches Personal, Piloten und Angehörige anderer Berufsgruppen, die häufig nachts arbeiten, auch Studenten im Prüfungsstress gehören zu den vielen Millionen Menschen in unserer 24-Stunden-Gesellschaft, die versucht sein dürften, Modafinil einzunehmen. Koffein und Nikotin waren die hauptsächlichen (legalen) Aufputschmittel der letzten beiden Jahrhunderte, Modafinil und seine Derivate könnten die Stimulanzien des 21. Jahrhunderts werden.

Folgerungen und Perspektiven

Da wir im Schlaf ohne Bewusstsein sind, wird uns auch die Bedeutung dieses wichtigen Aspekts unseres Lebens nur zu selten bewusst. Kurzum, wir neigen dazu, dem Schlaf keine Beachtung zu schenken. Wir haben erst ein höchst rudimentäres Verständnis seiner Funktion, und trotzdem scheinen wir wie unter Zwang, diese wichtige Domäne unserer Physiologie nonchalant zu ignorieren. In diesem Artikel wurden einige der Probleme erörtert, mit denen wir konfrontiert werden, wenn wir die Bedeutung des Schlafs und des circadianen Timings missachten. Unsere Biologie steht den Anforderungen unserer Gesellschaft ernsthaft entgegen, und welche Seite siegen wird, bleibt offen. Jahrmillionen der Evolution haben uns zwar zu dem gemacht, was wir sind, unser Problem ist nur, wir verstehen nicht wirklich, was das ist.

Wie wird es also weitergehen? Angesichts wachsender Einsichten in die Erzeugermechanismen von circadianer Rhythmik und Schlaf ist es durchaus vorstellbar, dass in den nächsten paar Jahren verschiedene Wirkstoffe entwickelt werden, mit denen sich diese Rhythmen manipulieren lassen. Vielleicht schaffen wir uns eine Welt, in der man nur noch 2 Stunden schläft und die übrigen 22 Stunden mit Betriebsamkeit füllt. Dies würde sich tief greifend auf die sozialen Strukturen auswirken, auf die Arbeitswelt, die Erziehung der Kinder und vielleicht sogar auf den Umgang mit dem wachsenden Anteil alter Menschen in unserer Bevölkerung. Wir könnten die erste Spezies werden, die sowohl den Tag als auch die Nacht beherrscht. Die letzte Front der Nacht ist mit Sicherheit bröckelig geworden, und wir setzen nun zu einer massiven Invasion an. Damit stehen wir vor einer schweren Wahl. Wir könnten die Entwicklung der 24-Stunden-Gesellschaft weiter vorantreiben und Medikamente bei Bedarf nutzen, um die unerwünschten biologischen Effekte des Rund-um-die-Uhr-Arbeitens zu kompensieren. Oder wir könnten uns diesem Trend entgegenstemmen und unsere Kenntnisse über die innere Uhr nutzen, um Schlaf und biologische Zeit sich zu Eigen zu machen – und so die Vorteile von Abermillionen Jahren Evolution einzustreichen.

Doch sind wir vielleicht schon zu weit gegangen? Haben wir eigentlich noch die Wahl? »Wir können die Uhren nicht zurückdrehen« und »der 24/7-Geist wird nicht in seine Flasche zurückkehren« sind Standardformeln der modernen Gesellschaft, und daher sind viele Menschen überzeugt, wir hätten keine andere Chance, als der Nacht den totalen Krieg anzusagen. Wie es scheint, wird die Technologie uns wahrscheinlich helfen, ein 24/7-Leben zu bewältigen. Doch bedeutet, »mit so etwas fertig zu werden«, wirklich zu leben? Vielleicht spielt diese Frage dann schon keine große Rolle mehr, weil viele von uns so abgestumpft sind, dass sie den Unterschied zwischen Vegetieren und Leben nicht mehr wahrnehmen können. Unsere Zukunft wäre doch sicherlich besser zu gestalten! ◁

AUTOREN UND HINWEISE

Russell G. Foster und **Katharina Wulff** arbeiten an der Abteilung für visuelle Neurowissenschaften am Imperial College in London, Charing Cross Hospital, Fulham Palace Road, London W6 8RF, Großbritannien.

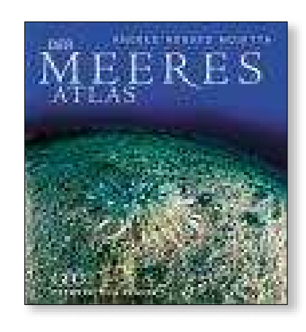
Zuschriften bitte an Russell G. Foster.
E-Mail: r.foster@imperial.ac.uk

Danksagung
Die Forschung im Labor von R.G. Foster wird vom Biological Sciences Research Council (BBRSC), dem Wellcome Trust und dem National Space Biomedical Institute (NSBRI) unterstützt. K. Wulff wird zurzeit durch ein Marie-Curie-Stipendium der EU gefördert.

Erklärung zu Interessenkonflikten
Die Autoren geben keine finanziellen Interessenkonflikte an.

doi: 1038/nrn1670 (englisches Original)

Alle Index-Zahlen im Text verweisen auf die Referenzen in der Literaturliste. Diese finden Sie mit weiteren Hinweisen und Links unter www.spektrum.de/schlaf



BILDBAND

Angelo Renato Mojetta

Der Meeresatlas

Aus dem Italienischen von Marion Pausch.
Frederking & Thaler, München 2004. 194 Seiten, € 50,–

Mit dem »Himmelsatlas« von Leopoldo Benacchio (Spektrum der Wissenschaft 2/2005, S. 98) hat der Verlag Frederking & Thaler eine neue Darreichungsform für Prachtbildbände eingeführt: Ausklapptafeln machen es möglich, in einem Buch von Standardausmaßen eindrucksvolle Abbildungen von fast Postergröße unterzubringen. Notwendige Erläuterungen und kleine Zusatzbilder finden bequem daneben Platz. Da räumt man zum Genuss des Werks bereitwillig einen Tisch frei.

Das Thema »Ozean« bietet sich für diese Präsentationsform geradezu an: Es gibt einen ähnlichen Reichtum an prachtvollen Bildern, die Fülle der Informationen über das Leben in den Weltmeeren ist erdrückend, der Autor ist nicht nur ein renommierter Meeresbiologe und erfolgreicher Wissenschaftsautor, das Vorwort sprudelt auch über von seiner Begeisterung für das Projekt – aber das Ergebnis ist enttäuschend.

Ja, es gibt vierfach seitengroße, beeindruckende Bilder von Korallen, Fischschwärmen und leuchtenden Quallen. Jede Ausklapptafel öffnet ein Fenster in einen anderen Aspekt des Meeres, und das Werk wirkt insgesamt gut gegliedert. Aber die Ausführung im Einzelnen! Die Brandungswelle wirkt in der monumentalen Vergrößerung nur unscharf. Viele Tierchen, von denen in der Beschreibung der kleinen Bilder die Rede ist, muss man mit der Lupe suchen. Die Texte versuchen derart viel auf kleinstem Raum unterzubringen, dass manchmal die Zusammenhänge nicht mehr erkennbar sind. Jedes Fenster soll einen von den anderen unabhängigen Einblick bieten, womit die vielen Wiederholungen gerechtfertigt werden. Aber dass die Ablösung einzelner Eisberge von einem Gletscher mit »kalben« bezeichnet wird, hätte man nicht viermal erzählen müssen.

Eine attraktive Idee mit hervorragendem Material ist durch banale handwerkliche Fehler schwer beeinträchtigt worden. Schade!

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.



Auf einen äußeren Reiz hin erstrahlt die Tiefseequalle *Atolla vanhoeffeni* in leuchtendem Rot (sitzend: die Rezensentin).





BOTANIK

Thomas Schauer (Text) und Claus Caspari (Farbzeichnungen)

Der BLV Pflanzenführer für unterwegs

BLV, München 2005. 496 Seiten, € 15,95

Bruno P. Kremer

Steinbachs Großer Pflanzenführer

Eugen Ulmer, Stuttgart 2005. 588 Seiten, € 14,90

Zwei Neuerscheinungen dieses Jahres helfen auf Exkursionen und Spaziergängen gefundene Blütenpflanzen zu bestimmen. Der seit zwanzig Jahren beliebte und weit verbreitete »Große Pflanzenführer« von Thomas Schauer und Claus Caspari hat einen exkursionsfähigen kleinen Bruder erhalten; und in der Reihe »Steinbachs Naturführer« ist der »Große Pflanzenführer« erschienen.

Beide Führer präsentieren sich im flexiblen Umschlag, der sich zur Mitnahme im Rucksack eignet – wenn man das doch erhebliche Gewicht nicht scheut. Von den in Deutschland vorkommenden knapp 4000 Farn- und Blütenpflanzenarten präsentiert der »Schauer/Caspari« 1150, der »Kremer« immerhin 850. Beide Bücher sind im Groben ähnlich gegliedert mit einem einführenden allgemeinen Teil, dem Hauptteil mit den Pflanzenbeschreibungen und -abbildungen, Index, Glossar und kurzen Beschreibungen der Gestalt der einzelnen Pflanzenorgane.

Im Detail gibt es beträchtliche Unterschiede. Das gilt bereits für die einführenden Texte: Schauer und Caspari beschreiben auf äußerst knappen viereinhalb Seiten die wichtigsten in Deutschland vorkommenden Lebensräume. Das






Zeichnung aus dem »Schauer/Caspari« und Foto aus dem »Kremer«: links die Wiesen-Flockenblume *Centaura jacea*, rechts der Faulbaum *Frangula alnus*

Kapitel ist im Wesentlichen eine stark gekürzte Version des entsprechenden Textes im »Großen Pflanzenführer«. Eine ausführlichere Beschreibung hätte nur wenig mehr Platz gekostet, dafür aber deutlich mehr Informationen und damit auch mehr Verständnis für das größere geobotanische Bild vermittelt. Kremer hingegen beschreibt auf 24 Seiten vor allem allgemeine Eigenschaften der drei Lebensformen Kraut, Strauch und Baum und die Merkmale der Artengruppen. Der Text bleibt allerdings oberflächlich und kann nicht so recht begeistern.

Die unterschiedlichen Pflanzengestaltungen sind bei Kremer anhand schematischer Abbildungen – eine Musterpflanze innen auf dem vorderen und eine Gestaltübersicht innen auf dem hinteren Buchdeckel – übersichtlich dargestellt. Schauer und Caspari zeigen diese Information auf mehreren Seiten im ausklappbaren hinteren Buchdeckel und illustrieren die einzelnen Formen mit Abbildungen konkreter Pflanzen. Auch das relativ ausführliche Glossar der Fachausdrücke und Pflanzenteile ist im Gegensatz zum »Kremer« mit konkreten Beispielen illustriert.

Ganz deutlich zeigen sich die Unterschiede der beiden Bücher aber im Hauptteil. Einen Bestimmungsschlüssel hat der »Kremer« nicht. Stattdessen leitet er jedes der drei Hauptkapitel über Kräuter (»Wildblumen«), Sträucher und Bäume mit mehrseitigen Übersichtstafeln ein, die in schönen Zeichnungen eine (zufällige?) Auswahl an Pflanzen abbilden. Bei den Kräutern dient die Blütenfarbe als Bestimmungsmerkmal, bei Sträuchern und Bäumen sind es Wuchsformen, Früchte, Zapfen, Blüten, Blätter und Nadeln.

Es folgen in jedem Hauptkapitel in pflanzensystematischer Reihenfolge auf je einer Doppelseite links eine bis sechs Pflanzen, die auf der Gegenseite mit meist sehr guten Bildern fotografisch abgebildet sind. Hier zeigt sich Kremers Vorliebe für Sträucher und Bäume: Sie haben durchschnittlich eine Seite für sich, während die Kräuter sich zu viert oder sechst eine Doppelseite teilen müssen. Zudem werden bei den Bäumen sehr viele nur in Parks vorkommende Arten beschrieben: Wo findet man in Deutschland in der freien Natur schon eine Chilenische Araukarie?

Die Beschreibungen sind gut gegliedert und übersichtlich, mit Detailfotos oder -zeichnungen (Blätter, Blütendetails, Früchte, Behaarungen und anderes) versehen und enthalten außer der reinen Artbeschreibung auch einen Abschnitt »Wissenswertes«. Bei den Kräutern ist der Platz für den Text eigentlich zu knapp bemessen; die Angaben zu Standort und Verbreitung sind in der Regel gleichwohl ausführlicher und detaillierter als bei Schauer und Caspari. Einige Gehölzpflanzen beschreibt Kremer sowohl bei den Sträuchern als auch bei den Bäumen, allerdings mit unterschiedlichen Texten und ohne auf die jeweils andere Beschreibung hinzuweisen.

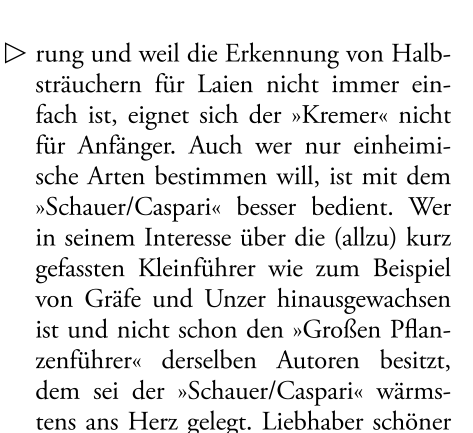
Ganz anders der Aufbau des »Schauer/Caspari«: Das Werk gliedert die Pflanzen (leider ohne die Farne zu berücksichtigen) nach Blütenfarben und -formen: radiäre Blüten mit bis vier oder mehr als vier Blütenblättern, zygomorphe (spiegelsymmetrische) Blüten und Scheinblüten. Innerhalb jeder dieser Gruppen werden die Arten nach ihrer Familienzugehörigkeit im herkömmlichen Pflanzensystem geordnet aufgeführt. Pflanzen mit grünlichen und bräunlichen Blüten werden nicht nach der Blütenform unterschieden, und Gräser, Bäume und Sträucher erscheinen in einer eigenen, nicht nach Blütenfarbe aufgegliederten Gruppe am Ende des Buchs. Pflanzen, deren Blütenfarbe sich im Verlauf der Entwicklung verändert (zum Beispiel Lungenkräuter), werden in beiden Farbkategorien (mit der gleichen Beschreibung) aufgeführt. Den zu dieser Gliederung passenden Bestimmungsschlüssel kann man aus dem vorderen Buchdeckel ausklappen und hat ihn so jederzeit zur Hand.

Jede Art ist im Hauptteil (vier bis sieben Arten pro Doppelseite) mit einem Kurztext von Thomas Schauer in Form und Lebensraum beschrieben und mit einer Abbildung illustriert. Sehr ähnliche Arten sind oft im Text mit den wichtigsten Unterscheidungsmerkmalen aufgeführt. Gut ist die Idee, Blütezeit, Größe und Hauptlebensräume als Symbole über jeden Beschreibungstext zu stellen. So bekommt man auf den ersten Blick eine Übersicht, die auch als Plausibilitätsprüfung für die erfolgte Bestimmung dienen kann. Schön wäre es gewesen, wenn – gerade in der heutigen Zeit – auch der Gefährdungsgrad als Symbol (zum Beispiel in Form eines Warndreiecks) in diese Symbolreihe integriert worden wäre. Leider sind die Texte selbst schlecht gegliedert und mit sehr vielen Abkürzungen versehen, sodass eine spezifische Information nicht immer einfach zu finden ist.

Im wissenschaftlichen Bereich können Fotografien guten Zeichnungen nicht das Wasser reichen

Die bewährten wunderschönen, plastischen und lebensechten Abbildungen von Claus Caspari machen das Schmökern zum Vergnügen und die einfache Gliederung das Bestimmen zum Kinderspiel. Es zeigt sich hier wieder einmal, dass Fotografien (und seien sie noch so gut wie bei Kremer) guten Zeichnungen im wissenschaftlichen Bereich nicht das Wasser reichen können. Viele Details der Wuchsform, die gerade dem Ungeübten beim Bestimmen helfen, sind in Zeichnungen besser darstellbar. Die wenigen von Casparis Sohn Stefan beigesteuerten, zusätzlichen Abbildungen fallen im Stil wegen ihrer Flachheit etwas ab.

Wegen des fehlenden Bestimmungssystems, der rein systematischen Gliede- ▷



▷ rung und weil die Erkennung von Halbsträuchern für Laien nicht immer einfach ist, eignet sich der »Kremer« nicht für Anfänger. Auch wer nur einheimische Arten bestimmen will, ist mit dem »Schauer/Caspari« besser bedient. Wer in seinem Interesse über die (allzu) kurz gefassten Kleinführer wie zum Beispiel von Gräfe und Unzer hinausgewachsen ist und nicht schon den »Großen Pflanzenführer« derselben Autoren besitzt, dem sei der »Schauer/Caspari« wärmstens ans Herz gelegt. Liebhaber schöner Pflanzenabbildungen werden gerne im Buch schmökern.

Wer die Pflanzen bereits selbstständig bestimmen kann und nur noch eine Bestätigung sucht, vor allem über Bäume und Sträucher etwas mehr als nur die reine Pflanzenbeschreibung erfahren will oder sich insbesondere auch für die hier zu Lande anzutreffenden Parkbäume interessiert, wird eher zum »Kremer« oder zu noch spezifischeren Bestimmungsbüchern greifen.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplom-Naturwissenschafter, hat über systematische Botanik geforscht und Exkursionen geführt. Er arbeitet als Systemadministrator an der ETH Zürich.



SEX

Rolf Degen

Vom Höchsten der Gefühle

Wie der Mensch zum Orgasmus kommt

Eichborn, Frankfurt am Main 2004. 304 Seiten,€ 19,90

Der Gentleman genießt und schweigt. Über den Orgasmus und die dazu gehörigen Aktivitäten spricht man nicht so unbefangen wie über andere Dinge, und frau schon gar nicht. Das hat zwei Folgen: Wenn es ins Detail geht, mangelt es an guten Wörtern – die verfügbaren klingen entweder lateinisch oder unfein. Und man hat Schwierigkeiten, die eigenen Erlebnisse und Verhaltensweisen mit denen anderer zu vergleichen.

Dem zweiten Problem will der freie Wissenschaftsjournalist Rolf Degen mit seinem Buch abhelfen. Dabei umgeht er das erste recht elegant durch sorgfältige Wortwahl. Keine Abbildung, keine persönlich gefärbte Erlebnisschilderung beeinträchtigt die streng wissenschaftliche Grundhaltung des Lesers.

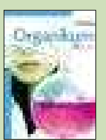
Und was die Wissenschaft alles über den Orgasmus herausgefunden hat! Man staunt, wie viele Freiwillige im Dienste der Wissenschaft über ihr Intimleben erschöpfend Auskunft gegeben haben. Etliche waren sogar bereit, den Akt samt gefühlsmäßigem Höhepunkt in der engen Röhre eines Computertomografen oder an Schläuche zur Blutentnahme gefesselt zu vollziehen.

Verglichen damit sind die Ergebnisse der Forschung weniger erregend. Seitenlang breitet Degen aus, dass die sexuellen Wünsche von Männern und Frauen sehr unterschiedlich und nicht immer leicht in Einklang zu bringen sind. Das ist nicht ganz neu. Sex macht nicht nur Spaß, sondern ist auch gesund, wie uns der Autor durch neckisch gereimte Überschriften nahe bringt: »Geil macht heil«, »Libido macht Menschen froh«, »Dem Missionar geht's wunderbar«, »Enthaltsamkeit schafft Seelenneid«, »Sünder sind gesünder«. Wer hätte das gedacht.

Die Auswerter unzähliger Fragebögen holen aus ihren Daten das Letzte heraus: Sie zählen die Antworten ihrer Versuchspersonen getrennt nach Bildungsstand, Schönheit, sexuellen Neigungen und der Größe ihrer Geschlechtsorgane aus – und stellen fest, dass alle diese Eigenschaften im Durchschnitt keinen merklichen Einfluss auf Häufigkeit und Erlebnisqualität der Orgasmen haben. Diese Nachricht ist zunächst beruhigend: Auch wenn der Vergleich mit der körperlichen Ausstattung und den – vom Film suggerierten – Aktionsmöglichkeiten der Pornodarsteller niederschmetternd ausfällt, darf Mann sich getrost für normal halten und von chirurgischen Bemühungen absehen. Dass zärtliches und einfühlsames Eingehen auf den Partner luststeigernd wirkt, ist allerdings aus den Untersuchungen ebenfalls nicht herauszulesen – was eher Zweifel an der Qualität der Untersuchungen weckt.

Interessanter sind da schon die Meldungen aus der Blutchemie. Ausgerechnet das die Milchbildung anregende Hormon Prolaktin ist es, das den Mann nach vollbrachter Tat in den Zustand seliger Untätigkeit (»afterglow«) versetzt. Und generell werden im Gehirn das Begehren und die Erfüllung des Begehrens durch verschiedene Stoffe vermittelt.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Heinz G. O. Becker, Werner Berger, Günter Domschke

Organikum

22., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Wiley-VCH, Weinheim 2004, 874 Seiten, € 59,–

Das »Organikum« okkupiert im Regal von Chemiestudenten einen obligaten Platz, und im Labor liegt es aufgeschlagen sowieso. Ernsthafte Konkurrenten sind nicht zu erkennen, und bis vielleicht eines Tages ein dreister Kandidat aus dem Morgennebel auf die Lichtung tritt, um den »Alten« herauszufordern, werden wohl noch einige Auflagen ins Land gehen. Das Werk hat nichts von seiner Frische verloren: Wie guter Wein ist es im Alter eher besser geworden.

Lehrbücher der organischen Chemie gibt es viele, das »Organikum« jedoch ist einmalig. Für jeden, der das Fach nicht nur theoretisch studieren, sondern auch praktizieren will, ohne Zweifel eine lohnende Investition. Ein Chemiestudent ohne »Organikum« – das ist wie ein Cowboy ohne Pferd.

Aus der Rezension von Thomas Lazar

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	23

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen**

Sattheit ist also auch hormonell etwas anderes als die Abwesenheit von Hunger.

Die Betrachtungen vom Standpunkt der Evolution wirken seltsam unergiebig. Es gibt zwei wesentliche Erkenntnisse, allerdings mit geringem Neuigkeitswert: Lustempfinden ist der Fortpflanzung förderlich; und da eine Frau für ein Kind erheblich mehr Energie und Zeit aufwenden muss als ein Mann, haben männliche und weibliche Gene unterschiedliche »Interessen« im Sinne der Theorie vom egoistischen Gen. Beides spiegelt sich im Verhalten der Tiere und der Menschen wider. Aber die Einzelheiten! Manche lassen sich evolutionär erklären, andere nur gewaltsam oder gar nicht, und wenn ein Verhalten eine evolutionäre Erklärung hat, ist es deswegen noch lange nicht richtig. Also kann man sich das Nachdenken über die Evolution an dieser Stelle auch sparen. Aber so deutlich sagt Degen das nicht.

Und dann der »Coolidge-Effekt«! Die zugehörige Anekdote ist noch ganz lustig. US-Präsident Calvin Coolidge (1872–1933) besucht mit seiner Gattin eine Hühnerfarm. Die First Lady wird informiert, dass der Hahn, den sie beobachtet, bis zu zwölfmal am Tag eine Henne besteige, und erwidert: »Sagen Sie das meinem Mann.« Man tut's; Coolidge fragt zurück, ob es immer dieselbe Henne sei. Nein, es sei jedes Mal eine andere. »Sagen Sie das meiner Frau.«

Coolidge-Effekt heißt also »der sexuelle Muff und die Fadheit in lang anhaltenden Zweierbeziehungen«, die Degen überaus heftig beweint. Na ja. Der Reiz der Abwechslung sei ja unbestritten; aber so schlimm ist es nun auch nicht, immer wieder mit derselben Frau zu schlafen.

Es ist auch nicht zu beanstanden, dass in einem Buch über den Orgasmus der Orgasmus im Mittelpunkt steht. Nur klingt es bei Degen häufig so, als sei der Orgasmus das einzig Wesentliche am Sex. Das halte ich für eine Blickverengung, die der Lust eher abträglich ist. Nicht die Maximumsnorm ist der richtige Maßstab, sondern eher die L^2-Norm, will sagen: Wenn es die ganze Zeit nur ein bisschen schön ist, dann ist das nicht unbedingt schlechter als die »zwölf Sekunden Seligkeit«, welche die Psychologen so sorgfältig mit der Stoppuhr ausgemessen haben.

Christoph Pöppe

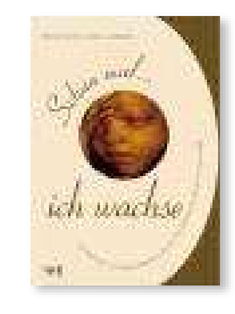
Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

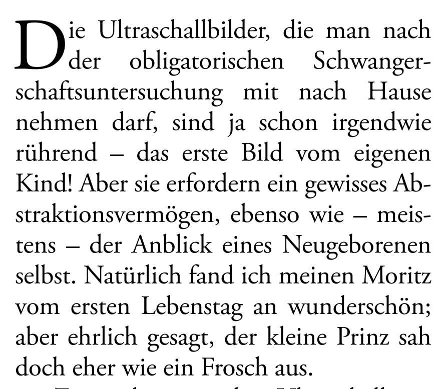
MEDIZIN

Stuart Campbell

Schau mal ... ich wachse

Egmont vgs, Köln 2005. 112 Seiten, € 12,90





Die Ultraschallbilder, die man nach der obligatorischen Schwangerschaftsuntersuchung mit nach Hause nehmen darf, sind ja schon irgendwie rührend – das erste Bild vom eigenen Kind! Aber sie erfordern ein gewisses Abstraktionsvermögen, ebenso wie – meistens – der Anblick eines Neugeborenen selbst. Natürlich fand ich meinen Moritz vom ersten Lebenstag an wunderschön; aber ehrlich gesagt, der kleine Prinz sah doch eher wie ein Frosch aus.

Zumindest was den Ultraschall angeht, erspart einem nun eine technische Entwicklung nicht nur das Abstrahieren, sondern gewährt völlig neue Einblicke. Statt eines Schnitts durch den Körper zeigen die neuen Geräte, über deren Technik man kaum etwas erfährt, ein richtig dreidimensionales Bild. Wenn die Rechenleistung ausreicht, kann man dem Kind sogar in Echtzeit beim Strampeln zuschauen – das eigene Kind als Filmstar.

Das vorliegende Büchlein zeigt in eindrucksvoller Weise, welche Qualität die Aufnahme- und Bildverarbeitungstechnik inzwischen erreicht hat. Ab Woche 6 findet sich zu jeder Schwangerschaftswoche mindestens eine Aufnahme vom Kind im Mutterleib. Der Fotograf ist ein alter Hase: Professor Stuart Campbell betreibt die pränatale Ultraschalldiagnostik seit 40 Jahren, und sein Arbeitsplatz, die »Create Health Clinic« in London, ist mit erstklassigem Gerät ausgestattet.

Zu jeder Woche gibt es auf ein bis zwei Seiten außer den Fotos Angaben zu Länge und Gewicht; außerdem erzählt das Kind, was es in der jeweiligen Woche an Körperbau und Fähigkeiten zugelegt hat.

Eingestreute kleine Kästen und ein abschließendes Kapitel »Die häufigsten Fragen« enthalten eine etwas willkürliche Sammlung von Zusatzinformationen. Wesentlich interessanter sind die an verschiedenen Stellen eingefügten Doppelseiten über das Verhalten des Babys im Mutterleib. Es ist schon eindrucksvoll, das Kind hüpfen, gähnen oder lächeln zu sehen.

Auch Stuart Campbell muss allerdings indirekt zugeben, dass hier eine faszinierende Technik bislang vergeblich auf der Suche nach einer Anwendung ist. Der medizinische Wert der 3-D-Bilder ist – jedenfalls zurzeit – vernachlässigbar. Ob das Kind an einer Fehlbildung leidet, kann der erfahrene Arzt auf dem konventionellen Ultraschallbild mindestens so gut erkennen.

Hilfsweise weist Campbell darauf hin, dass der realistische Anblick des eigenen Kindes die Mutter-Kind-Bindung (»bonding«) in besonderem Maße fördert. Das ist in der Tat der Fall, mit dem Effekt, dass bereits geschäftstüchtige Ärzte die Babybildchen zu stolzen Preisen als Zusatzleistung bei der Schwangerenbetreuung anbieten. Da heißen dann die bewegten Bilder auch schon mal »vierdimensional«, weil die Zeit als vierte Dimension hinzukommt.

Aber ich gebe zu: Die Babybilder sind wirklich wunderschön. Und ich bin mir nicht ganz sicher, ob ich mir nicht vielleicht doch eins gegönnt hätte, wenn entsprechendes Gerät für mich verfügbar gewesen wäre.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Wissenschaft Online in Heidelberg. Sie wurde am 7. Juli Mutter eines Knaben namens Maximilian David.



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

Das Minderheitsspiel

Anders zu sein als die anderen ist lukrativ, aber nicht einfach – vor allem, wenn man nur über einen beschränkten Verstand verfügt.

Von Christoph Pöppe

Die Bar »El Farol« in Santa Fe (New Mexico) ist ein beliebtes Nachtschwärmerziel. Jeden Donnerstagabend gibt es irische Musik, zu anderen Zeiten auch Flamenco. An lauen Sommerabenden wird es häufig so voll, dass einem das Gedränge den Spaß verdirbt.

Nehmen wir an, es ist ein lauer Sommerabend, und das Musikprogramm entspricht unserem Geschmack. Sollen wir hingehen? Der Wirtschaftswissenschaftler W. Brian Arthur, der am Santa Fe Institute in der gleichnamigen Stadt arbeitet, stellte die Frage in wissenschaftlicher Form, und so ist sie als das »El Farol bar problem« bekannt geworden.

Es ist ein überraschend schwieriges Problem, jedenfalls wenn man es vom Standpunkt der klassischen Ökonomen betrachtet. Diese Leute glauben nämlich immer noch an den Homo oeconomicus, jenes fiktive Wesen, das die ihm zugänglichen Informationen fehlerlos verarbeitet und daraufhin unter mehreren Alternativen diejenige auswählt, die seinen Nutzen maximiert. Auf einem Gütermarkt agieren zahlreiche Exemplare dieser Spezies mit nichts als dem eigenen Profit im Sinn und erreichen trotzdem einen für alle optimalen Zustand (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 60). Aber wenn diese so ungeheuer rationalen Wesen zur Bar wollen – oh weh!

Nehmen wir zur Vereinfachung an, dass sie alle nur das Eine wollen: zur Bar, wenn es nicht zu voll ist, und ansonsten zu Hause bleiben. Wird es heute Abend voll werden? Dazu müssten die Leute aus den verfügbaren Informationen – die für alle gleich sind – Schlüsse ziehen und eine Prognose stellen – die für alle gleich ist, denn sie sind ja alle rational. Also gehen sie entweder alle hin, sodass es voll wird, oder bleiben alle zu Hause und lassen sich einen schönen Abend entgehen. Frustriert sind sie auf jeden Fall.

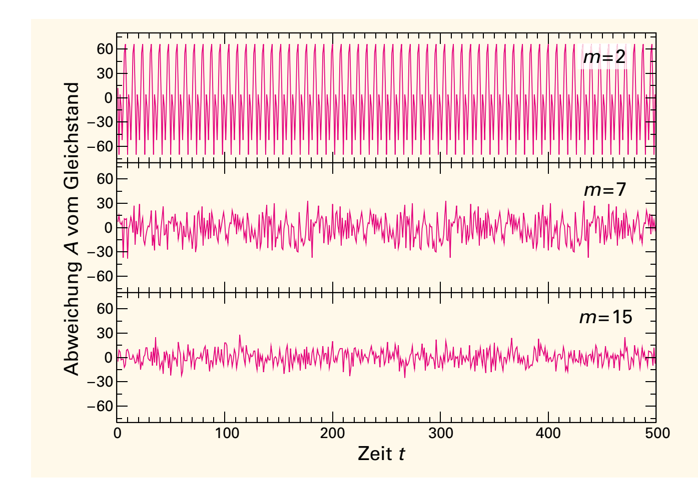
Gegen den Strom schwimmen

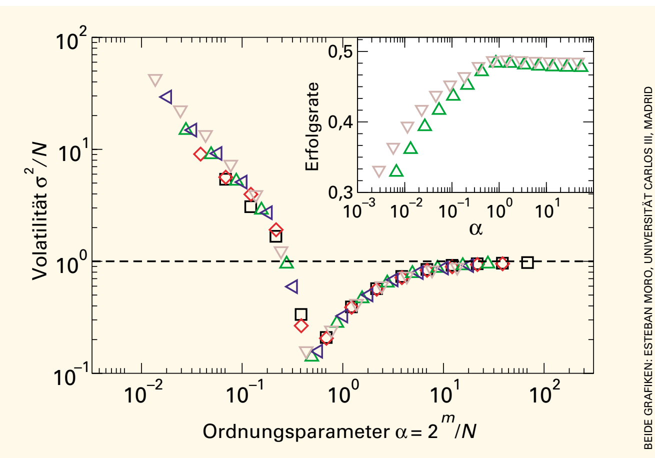
Am Ende gewinnen diejenigen, die in der Minderheit sind. Also kann es kein Rezept zum Gewinnen geben, denn wenn es eines gäbe, würden alle es anwenden, und dann wären sie keine Minderheit mehr. Für die Bar muss das mit der Minderheit nicht genau stimmen: Wenn es 500 Interessenten gibt und 100 Sitzplätze, dann sind 200 Barbesucher eine Minderheit gegenüber den 300 Daheimgebliebenen und trotzdem frustriert. Aber die wesentlichen Züge des Problems bleiben erhalten, wenn wir unterstellen, dass es genau doppelt so viele Interessenten wie Plätze gibt – plus einen, also zum Beispiel 301 Interessenten für 150 Plätze. (Wozu den einen Überzähligen? Damit man sich über den Spezialfall der Stimmengleichheit keine Gedanken zu machen braucht.)

Situationen von der Art des Minderheitsspiels gibt es zuhauf. Der Autofahrer, der zwei staugefährdete Wege zum selben Ziel zur Auswahl hat, möchte denjenigen wählen, für den sich die Minderheit entscheidet. Der Urlauber reist, um dem Massenandrang zu entgehen, an den Strand, den die Zeitung als Geheimtipp empfohlen hat. Das Rehlein äst am liebsten dort, wo die anderen ihm nichts wegfressen. Nehmen wir an, der Börsenspekulant müsse sich fürs Kaufen oder fürs Verkaufen entscheiden, bevor er weiß, was die anderen tun. Dann möchte er unter seinesgleichen in der Minderheit sein, denn viele Käufer bei wenigen Verkäufern treiben den Preis hoch, was den Verkäufern gefällt, und umgekehrt.

Da das Problem in so vielen Verkleidungen vorkommt, lohnt eine mathematische Abstraktion. Damien Challet von der Universität Fribourg (Schweiz) hat das getan und mit seinem »Minority Game« eine Flut von Veröffentlichungen ausgelöst. Sein Minderheitsspiel hat viele Mitspieler (»Akteure«) und verläuft nach folgenden Regeln: In jedem Spielzug kann ein Akteur zwischen zwei Alternativen A (zur Bar gehen; kaufen) und B (zu Hause bleiben; verkaufen) wählen. Wer sich nach dem Zug als zur Minderheit gehörig herausstellt, bekommt einen Pluspunkt, die Mitglieder der Mehrheit bekommen je einen Minuspunkt. Ziel des Spiels ist, in vielen Runden eine möglichst hohe Gesamtpunktzahl zu erreichen.

Die Spieler können sich untereinander nicht verständigen. Die einzige verfügbare Information ist der Ausgang der vergangenen Spielzüge, wann also im bisherigen Spielverlauf A und wann B in der Minderheit war.





BEIDE GRAFIKEN: ESTEBAN MORO, UNIVERSITÄT CARLOS III, MADRID





BEIDE FOTOS: EL FAROL, SANTA FE

In der Bar »El Farol« (»Die Laterne«) in Santa Fe (New Mexico) wird es an manchen Abenden richtig voll.

Was soll man tun? Jedenfalls nicht das, was die anderen tun. Die Ausweichempfehlung zur Staumeldung, der Urlaubs-Geheimtipp in der Zeitung, der Börsentipp: Sie alle können gut recherchiert und vernünftig sein – und widerlegen sich dennoch selbst, sowie sie massenhaft befolgt werden.

Stattdessen könnten die El-Farol-Fans zum Beispiel eine Münze werfen und nur zur Bar gehen, wenn »Kopf« erscheint. Dann ist rein per Zufall immer ziemlich genau die Hälfte da. Allgemein sorgt das Münzwurfverfahren dafür, dass die Minderheit stets knapp unter 50 Prozent liegt und damit so hoch wie nur möglich. Das ist günstig für das Gemeinwohl und damit auch günstig für jeden Einzelnen, der durch das Zufallsverfahren auf die Dauer seinen gerechten Anteil abkriegt. Allerdings gibt es immer wieder erhebliche Abweichungen von den 50 Prozent und damit ungenutzte Gewinnmöglichkeiten; einzelne Angehörige einer erdrückenden Mehrheit hätten sich ja anders entscheiden und damit Punkte kassieren können, ohne anderen welche wegzunehmen – wenn sie das vorher gewusst hätten.

Oder die Spieler legen sich feste Gewohnheiten zu. Wenn eine Clique immer nur an geraden Tagen zur Bar geht und die andere an ungeraden, und beide Cliquen umfassen jeweils ziemlich genau die halbe Bevölkerung, dann ist jeden Tag eine starke Minderheit glücklich.

Ein solches koordiniertes Verhalten kann sich selbst dann einstellen, wenn es keine Verständigung der Akteure untereinander gibt. Ein Mensch, der sich regelmäßig in der Mehrheit wiederfindet, kann genau das zum Anlass nehmen, seine Gewohnheiten zu ändern. Dadurch schrumpft die Mehrheit und wächst die Minderheit, bis beide fast genau gleich groß sind.

Links: $N=301$ Individuen spielen das Minderheitsspiel in der Variante, bei der die Belohnung proportional zur Abweichung A vom Gleichstand ist. Je größer der Verstand (m ist die Reichweite des Gedächtnisses), desto besser die allgemein erwünschte Annäherung an den Gleichstand. Rechts die Volatilität (»Flüchtigkeit«, Schwankungsintensität) von A und die durchschnittliche Erfolgsrate des einzelnen Akteurs, aufgetragen gegen den Ordnungsparameter $\alpha = 2^m/N$ für das Minderheitsspiel mit $N=101$ (□), 201 (◇), 301 (△), 501 (◁) und 701 (▽).

Partygänger im Computer

So oder so ähnlich machen es die Börsengurus auch. Sie haben zwar nicht gerade feste Gewohnheiten, aber verschiedene Analyseprogramme zur Auswahl. Jedes dieser Programme nimmt die Kurse der letzten Tage entgegen und errechnet daraus eine Prognose für den Kurs von morgen, was auf eine konkrete Verhaltensempfehlung – kaufen oder verkaufen – hinausläuft. Wie das einzelne Programm zu seiner Empfehlung kommt, bleibt dessen Geheimnis. Der Spekulant, der zunächst nicht weiß, was er von den verschiedenen Programmen halten soll, testet sie alle aus und folgt dann der Empfehlung desjenigen, das in der Vergangenheit am häufigsten richtig gelegen hat.

Das ist die Grundidee hinter Challets Version des Minderheitsspiels, bei der ein Computerprogramm alle Akteure simuliert. Keiner von ihnen würfelt; aber sie sind lernfähig, und vor allem kommen sie schon verschieden auf die Welt. Denn wenn sie alle gleich wären, hätten sie das gleiche Pech wie die oben beschriebenen rationalen Wesen.

Jeder Akteur ist von Geburt an nach dem Zufallsprinzip mit einem Satz von so genannten Strategien ausgestattet. Das sind Primitivversionen der genannten Analyseprogramme: Man gibt ihnen die Ergebnisse der letzten, sagen wir, sechs Spielzüge, und sie geben eine Verhaltensempfehlung für den nächsten Zug.

Für jedes der vergangenen Ergebnisse gibt es nur zwei Möglichkeiten. Die kann man nach Computerart durch die Binärziffern 0 und 1 ausdrücken, die gesamte Vorgeschichte der letzten sechs Züge ist also nichts weiter als eine sechsstellige Binärzahl wie zum Beispiel 101101, alle möglichen Vorgeschichten sind die Binärzahlen von 000000 = 0 bis 111111 = 63 im Dezimalsystem, und eine Strategie ist nichts weiter als eine Tabelle, die dem Spieler zu jeder Vorgeschichte, sprich jeder Nummer von 0 bis 63, ansagt, ob er sich für A oder B entscheiden soll.

Man kann auch sagen: Jeder Spieler ist von der Natur mit einem beschränkten Verstand ausgestattet. Er kann sich nur die letzten sechs Ereignisse merken; das ist alles, was man über den Zustand der Welt weiß, und diese Information ist für alle Spieler gleich. In verschiedenen Simulationen haben Challet und seine Kollegen die Reichweite des Spielergedächtnisses variiert; nennen wir sie m. Anstelle von $m = 6$ gab es also Spiele mit dumpfsinnigen Teilnehmern, die sich gerade noch an vorgestern erinnern konnten ($m = 2$), und solchen mit dem Zwei-Wochen-Elefantengedächtnis ($m = 14$).

Der computersimulierte Spieler sagt also A oder B und bekommt nach dem Spielzug die Auskunft zurück, ob er gewonnen hat – das heißt zur Minderheit gehörte – oder nicht. Daraufhin schaut er für jede seiner Strategien nach, ob sie mit ihrer Empfehlung richtig gelegen hat; wenn das der Fall war, gibt er ihr einen Pluspunkt. Auf die Dauer sammeln die verschiedenen Strategien in seinem Kopf unterschiedlich viele Punkte an, und der Spieler folgt bei jedem Zug der ▷

▷ Strategie mit der höchsten Punktzahl. Gibt es mehr als eine Strategie mit maximaler Punktzahl, entscheidet das Los.

Ein Akteur kann also aus Erfahrung lernen, indem eine Strategie eine andere in der Punktzahl überrundet. Und der Lernprozess ist erfolgreich! In vielen Computersimulationen stellten Challet und seine Kollegen fest, dass seine Akteure ein besseres Gesamtergebnis, das heißt eine höhere Punktesumme, erzielten als eine gleiche Anzahl würfelnder Spieler. Irgendwie ist es ihnen also gelungen, aus der kärglichen Information über die vergangenen Ergebnisse Gewinn zu ziehen, und zwar umso besser, je länger ihr Gedächtnis zurückreichte (Bild S. 104). Allerdings gewannen sie diese Information ohne Sinn und Verstand, durch schlichtes Austesten der Strategien und Auswahl der jeweils besten.

Taugen diese Chartanalyse-Programme etwa doch etwas? Vorsicht. Das Ergebnis der würfelnden Spieler zu übertreffen gelingt nur unter gewissen Voraussetzungen. Die Forscher variierten die Gesamtzahl N der Spieler ebenso wie die Reichweite m des Spielergedächtnisses. Dabei stellte sich heraus, dass es für den Ausgang des Spiels nicht wirklich auf beide Zahlen N und m ankommt, sondern auf ihre Kombination: $\alpha = 2^m/N$ heißt der entscheidende Faktor. Wenn α ungefähr 1/2 ist, funktioniert die Kooperation unter den Spielern hervorragend. Für große α nähert sich die Qualität der Ergebnisse dem Wert für die Würfelspieler, für sehr kleine α ist sie noch weit schlechter (Bild S. 104 rechts).

Jeder möchte eine Meinung haben, die sonst keiner teilt

Der Parameter α ist so etwas wie eine Meinungsvielfalt, allerdings gemessen an der Gesamtzahl der Meinungsträger. Erinnern wir uns: Ein einzelnes Mitglied der Gesellschaft bildet sich seine Meinung – sprich seine Strategie – zwar aus der Erfahrung; es hat jedoch von Geburt an nur relativ wenige Strategien, unter denen es überhaupt wählen kann. Wenn es nun ungefähr halb so viele denkbare Meinungen gibt wie Spieler überhaupt ($\alpha = 1/2$), dann tut jeder Spieler gut daran, so individualistisch zu sein wie überhaupt möglich, das heißt sich eine Meinung zuzulegen, die von keinem anderen geteilt wird. Das ist die einzige Chance, häufiger als durch Zufall in die glückselige Minderheit zu geraten.

Diese Überlegung hat allerdings einen kleinen Haken. 2^m ist nicht etwa die Anzahl der möglichen Meinungen, sondern die Anzahl der für die Spieler unterscheidbaren Weltzustände. Da man zu jedem Weltzustand genau zwei verschiedene Meinungen haben kann (nämlich die Spielempfehlungen A und B), ist die Anzahl der denkbaren Strategien nicht 2^m, sondern viel größer, nämlich 2^{2^m}.

Um zu erklären, warum sich im Computerexperiment von den 2^{2^m} nur

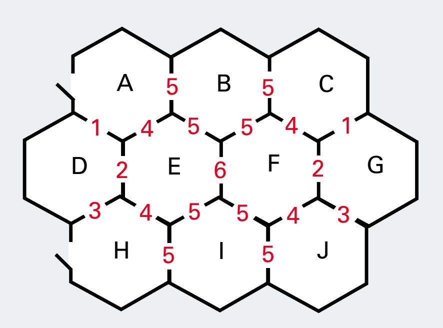
PREISRÄTSEL

Rosenkavaliere

Von Roland Mildner

Aus einer Anzeige der Zeitschrift »Schloss und Hofhund«: »Königstochter nach besonderer Prüfung in liebevolle Prinzenhände abzugeben! Jeder Prinz des Landes ist aufgerufen, Schloss Hexagramm fünfmal über Raum *A* zu betreten und über Raum *H* zu verlassen (Skizze rechts). Dabei darf er bei einem Gang jeden Raum höchstens einmal betreten. An jeder Tür, die er durchschreitet, erhält er die in der Abbildung angegebene Anzahl Rosen. Der Kavalier, welcher der Prinzessin am Ausgang beim ersten Gang 7 Rosen, beim zweiten 14, beim dritten 21, beim vierten 28 und beim fünften 35 Rosen überreicht, bekommt sie zur Frau.«

Nennen Sie jeweils eine Möglichkeit für die fünf Wege, die den Prinzen in die Ehe führen.



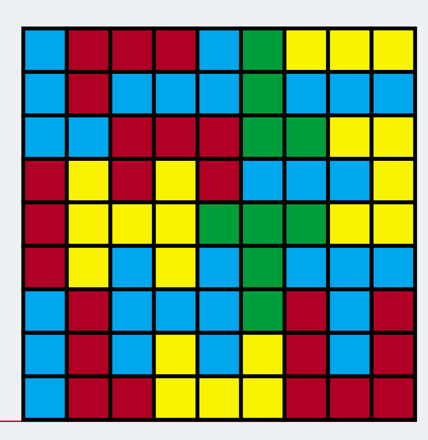
Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Sweatshirt-Jacken mit Spektrum-Logo. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. August 2005, eingehen.

Lösung zu »Patchworkfamilie« (Juni 2005)

Rechts ist eine Möglichkeit abgebildet, wie die Quadratur der Lichts zu erreichen ist.

Wie viele Lösungen es gibt, ist unbekannt. So hat beispielsweise Helmut Meißner aus Oberaudorf mit einem Basic-Programm nach Lösungen gesucht und nach fünf Tagen und 500 gefundenen Lösungen den Algorithmus abgebrochen.

Die Gewinner der fünf schwebenden Kugelschreiber »Pen Ultimate« sind Kristin Schantora, Weischlitz; Andrea Lochmahr, Wettstetten; Philipp Reintanz, Kassel; Klaus Timmel, Freiberg; und Ulrika Steinbrück, Rottenburg.



Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

bescheidene 2^m bemerkbar machen, betreiben Challet und seine Kollegen Geometrie im abstrakten Raum der möglichen Strategien. Zwei Strategien haben per Definition einen umso größeren Abstand voneinander, je mehr Unterschiede sie in ihren 2^m Spielempfehlungen aufweisen. Ein Unterschied an einer einzigen Stelle macht sich auch nur entsprechend selten bemerkbar. Zwei Spieler mit derart ähnlichen Strategien werden sich nur allzu häufig mit der gleichen Meinung wiederfinden und damit eher in der Mehrheit als in der Minderheit. Entsprechend weniger Punkte sammeln diese Strategien in der persönlichen Bilanz jedes Spielers an.

Das hat denselben Effekt, als würden die Spieler auf Punkten im abstrakten Strategieraum sitzen und abstoßende Kräfte aufeinander ausüben. Wer kann, wechselt die Strategie, das heißt, er hüpft auf einen anderen Punkt, in dessen Umgebung es nicht so voll ist. Auf die Dauer stellt sich also im Strategieraum eine einigermaßen gleichmäßige Verteilung aus Punkten ein. Jeder von ihnen hat in seiner Umgebung so etwas wie eine Privatsphäre, die ihn einzigartig macht. Es ist dann nicht die Anzahl der Punkte im Strategieraum, auf die es ankommt, sondern die der einigermaßen komfortablen Privatsphären.

Das funktioniert aber nur, wenn es ausreichend Platz gibt! Wenn nämlich wegen zu kurzen Verstandes ($m = 2$) sehr viele Leute in einem engen Strategieraum Platz finden müssen, geraten schon durch Zufall sehr viele auf ein und denselben Punkt; daran kann sich durch das Strategie-wechsel-dich-Spielchen nichts Wesentliches ändern. Die Bevölkerung zerfällt dann in relativ wenige Fraktionen, die jeweils einer Strategie anhängen und damit bei jedem Zug geschlossen in der Mehrheit oder der Minderheit landen. Fraktionswechsel sind zwar erlaubt, können aber dieser Vergröberung der Entscheidungsprozesse nicht ernsthaft entgegenwirken.

Wenn dagegen α einen großen Wert annimmt, sitzen in einem weit gehend wüsten und leeren Strategieraum relativ wenig Leute – und merken nicht viel voneinander. Ein paar zufällig eng benachbarte Punkte wird es im Lauf der Zeit zwar etwas auseinander treiben, aber insgesamt gesehen ähnelt das Verhalten des Kollektivs doch sehr einer Zufallsbewegung.

Bei aller Inspiration, die das Spiel aus dem Verhalten der Menschen, vor allem der Partygänger und der Börsenspekulanten bezogen hat, ist es doch sehr abstrakt. Viele kleine Einheiten stehen in einer sehr speziellen Wechselwirkung miteinander und geraten dabei in die merkwürdigsten kollektiven Zustände. So etwas ruft unweigerlich die theoretischen Festkörperphysiker auf den Plan – Damien Challet ist selbst einer –, und die denken dann an Atome in einem Festkörper, Spins in einem magnetisierbaren Material und vor allem Phasenübergänge. Der Parameter α spielt dabei die Rolle einer Temperatur. Zur festen Phase gehören die Spieler, die ihre Meinung nicht mehr ändern, weil eine ihrer Strategien in der inneren Bilanz einen uneinholbaren Vorsprung hat; die anderen sind noch beweglich, »flüssig«.

Entscheidend: der gemeinsame Irrglaube

Zahlreiche Varianten des Spiels sind erdacht worden. Die Grundausstattung der Spieler mit Strategien wurde variiert. Zwei müssen es mindestens sein, damit sich überhaupt ein Lernprozess abspielen kann; mehr ändern nichts Wesentliches an den Ergebnissen, wie sich herausstellt. Es macht auch nur einen geringen Unterschied, wenn die Punkte für die Spieler nicht nach dem Ja-Nein-Prinzip vergeben werden (1 für die Minderheit, –1 für die Mehrheit), sondern proportional der Abweichung vom Gleichstand: je kleiner die Minderheit, desto größer die Belohnung für den Nonkonformisten.

Andere Interpretationen sind bei der hohen Abstraktheit ebenfalls möglich. So haben verschiedene Leute eine darwinistische Evolution mit ins Siel gebracht: Alle paar Zeitschritte stirbt das Individuum mit der bis dahin schlechtesten Punktzahl und wird durch einen Klon des Punktbesten ersetzt, allerdings ohne dessen Lebenserfahrung: Die interne Bilanz der Strategien steht auf null wie bei einem Neugeborenen. Auch Mutationen wurden untersucht.

Dann kam die Überraschung. Der theoretische Physiker Andrea Cavagna, damals in Oxford, nahm den Spielern das Einzige, was sie zur Grundlage ihrer Entscheidungen nehmen konnten, nämlich die allen gemeinsame Erfahrung über die Vergangenheit, ersetzte sie durch irgendwelchen, für alle gleichen Nonsens, und es passierte – gar nichts! Im Ganzen gesehen blieb das kollektive Verhalten der Spieler unverändert.

Das verblüfft und lässt die Tätigkeit der Chartanalysten in einem neuen Licht erscheinen. Gut, sie holen aus allgemein verfügbarer Information noch etwas heraus, das unter günstigen Umständen sogar realen Nutzen einbringt – aber nicht, weil diese Information etwas wert wäre. Aus der Vergangenheit an sich lernt man gar nichts. Man nutzt allein die Tatsache aus, dass alle anderen ebenfalls dem Irrglauben unterliegen, man könne aus der Vergangenheit etwas lernen. Das macht ihr Verhalten bis zu einem gewissen Grad berechenbar.

Ich habe hier einen Geheimtipp, den ich veröffentliche mit dem Ziel, dass alle Leute daran glauben: Es sind überhaupt nicht die Börsenkurse der letzten Woche, die ihr in eure Chartanalysen eingeben sollt. Es sind die Lottozahlen vom letzten Samstag. Mit einem wissenschaftlich getesteten Analyseprogramm, das ich euch hiermit zum kostenlosen Download anbiete – damit ihr alle es anwendet – und mit Zufallskomponenten versehen – damit es nicht so auffällt –, könnt ihr daraus die Kauf- und Verkaufsempfehlungen für die nächste Woche errechnen. Der Einzige, der konsequent gegen die Prognosen meines eigenen Programms spekuliert, bin ich – und werde steinreich dabei. Schön wär's. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

The Minority Game: an introductory guide. Von Esteban Moro in: Advances in condensed matter and statistical physics. Von Elka Korutcheva und Rodolfo Cuerno (Hg.). Nova Science Publishers, 2004

Irrelevance of memory in the minority game. Von Andrea Cavagna in: Physical Review E, Bd. 59, S. R3783, 1999

Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game. Von D. Challet und Y.-C. Zhang in: Physica A, Bd. 246, S. 407, 1997

Inductive reasoning and bounded rationality. Von W. Brian Arthur in: The American Economic Review, Bd. 84, S. 406, 1994

Online-Versionen der angegebenen Literatur und weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wer fördert die Daniel Düsentriebs?

Kinder können ihren natürlichen Gestaltungstrieb später als Ingenieure ebenso sinn- wie lustvoll entfalten; doch unser Erziehungssystem ignoriert diese Option fast völlig.

Von Henry Petroski

Kinder sind geborene Ingenieure. Was sie sehen, wollen sie verändern. Sie wollen sich ihre eigene Welt erschaffen. Sie wollen aus Klängen Wörter formen. Sie wollen Klötzchen, Dosen und Kisten aufeinander stapeln. Sie wollen ihr Essen nicht nur hinabschlingen, sondern auch damit spielen. Sie wollen mit Wasser spritzen, Sandburgen bauen, Dämme errichten und Seen aufstauen. Sie wollen Schiffe schwimmen und Flugzeuge fliegen lassen. Sie wollen Türme und Brücken errichten. Sie wollen sehen, wie Autos und Laster über selbst angelegte Straßen rollen. Sie wollen zeichnen und malen. Sie wollen Armeen befehligen und Puppen auseinander nehmen. Sie wollen Spiele machen – manchmal auch am Computer.

Erwachsene Ingenieure, deren Tätigkeit so alt ist wie die Anfänge der menschlichen Zivilisation, haben sich viel von der Neugier, Experimentierfreude und Fantasie eines Kindes bewahrt. Deshalb stoßen sie bei den Kleinen, wenn sie ihnen ihr Handwerk auf deren Niveau präsentieren, stets auf begeistertes Interesse. Kein Kind ist zu jung für einfache Konstruktionsaufgaben. Wir alle haben früher eigenes Spielzeug gebastelt und uns selbst Spiele ausgedacht – manchmal sogar imaginäre Spielpartner dazu.

Das Spielerische ist ein Grundelement des Ingenieurwesens, bei dem es immer auch um das Erfinden und Ausprobieren von Neuem geht. Das hat nichts mit Leichtsinn oder Tändelei zu tun. Doch am Anfang eines Entwurfs steht stets die Fantasie, die es in die Bahnen des Machbaren zu lenken gilt, damit aus Träumen Realität wird.

Schon bei ihren frühesten Beschäftigungen praktizieren Kinder grundlegende Prinzipien der Ingenieurskunst, aber kaum jemand merkt das. Wenn in amerikanischen Kinderstuben das Wort Ingenieur fällt, dann nur in der Bedeutung von Lokführer. Niemand ist da, der den Kleinen sagt, dass aus ihrem spielerischen Tun einmal ein ernsthafter Beruf werden könnte.

Maschinenbau in der Schule – Fehlanzeige

Auch die Ingenieure selbst haben verständlicherweise Hemmungen, ihre Tätigkeit mit kindlichem Spiel in Verbindung zu bringen. Immerhin blicken sie auf ein langes, schweres Studium zurück, in dem sie sich mühsam das intellektuelle Rüstzeug für die Ausübung ihres Berufs aneignen mussten: tief greifende Kenntnisse über Atome und Moleküle, Spannung und Dehnung, Wärme und Leistung, Ströme und Widerstände, Bits und Bytes. Sie handhaben Gleichungen, nicht Klötzchen. Sie benutzen Computer für seriöse Berechnungen und Modellierungen, nicht für Spaß und Spiel. Sie entwerfen und bauen reale Türme und Brücken, die selbst extremen Belastungen standhalten müssen und deren Versagen katastrophale Folgen hätte – keine Dosenstapel, die beim kleinsten Stoß kippen und dabei keinerlei Schaden anrichten.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Schon viel wurde über die rückläufigen Studentenzahlen in den ingenieurwissenschaftlichen Fächern gesagt und geschrieben. Auch eine der Hauptursachen ist lange bekannt: In der Schule erfahren die Schüler so gut wie nichts über Dinge wie Maschinenbau oder Elektrotechnik; denn sie kommen in den Lehrplänen nicht vor. Zwar werden sie in der Oberstufe in den Fächern Physik und Chemie teils mitbehandelt, aber nicht explizit kenntlich gemacht. So kann natürlich auch kein Interesse daran geweckt werden. Wir tun unseren Kindern keinen Gefallen damit, die Ingenieurwissenschaften während der gesamten Schulzeit praktisch auszublenden oder unter falscher Flagge zu vermitteln, statt sie als solche zu lehren. Schließlich bringen selbst Vorschulkinder schon ein tiefes Verständnis für dieses Fach mit – für das Erfinden, Entwerfen und Konstruieren, das sein Wesen ausmacht. Das ist es schließlich, was sie spielerisch große Teile des Tages hindurch tun.

Nicholson Baker schreibt in seinem Roman »The Mezzanine« (Titel der deutschen Ausgabe: »Rolltreppe oder die Herkunft der Dinge«): »Schuhe sind die ersten Erwachsenenmaschinen, die wir zu meistern haben.« Wir lernen Schuhe zu binden, noch bevor wir zur Schule gehen. Dies ist keine leichte Aufgabe, wie sich die meisten von uns erinnern werden. Und die Lösung ist keineswegs so eindeutig wie das Alphabet, das im Unterricht eingeübt wird. Es gibt verschiedene Arten, einen Schuh zu binden – was man schnell feststellt, wenn man Kindern dabei hilft, ihre Knoten wieder zu lösen. Auch die Abfolge der Handgriffe kann variieren – im Unterschied zur Reihenfolge der Buchstaben im Alphabet. Manchmal gibt es regelrechte familiäre Traditionen; denn die meisten Kinder lernen den Trick von ihren Eltern. An der Existenz unterschiedlicher Methoden lässt sich erkennen, dass es sich letztlich um ein – natürlich sehr einfaches – ingenieurwissenschaftliches Pro- ▷

▲ Schon Kinder bauen gerne hohe Türme. Doch niemand weist sie darauf hin, dass sie dasselbe später mit genauso viel Spaß als Ingenieure tun könnten.

▷ blem handelt; denn die haben selten nur eine Lösung: In der Regel gibt es mehrere Ausführungen für ein Gerät oder Bauwerk mit einer bestimmten Funktion.

Das Binden – oder auch das Schnüren – eines Schuhs lässt sich somit leicht für eine spielerische Einführung in das Wesen der Ingenieurwissenschaften nutzen. Die Rubrik »Science Times« der »New York Times« befasste sich unlängst mit Berechnungen des Mathematikers Burkard Polster von der Monash-Universität in Victoria (Australien). Demnach gibt es mehr als 40 000 unterschiedliche Arten, einen Schuh mit zwei Reihen zu je sechs Löchern zu schnüren. Um die effizienteste Methode zu ermitteln, verallgemeinerte Polster das Problem, indem er den zu verschnürenden Schuh als Flaschenzug betrachtete. Außerdem berechnete er, welches Schnürmuster mit dem kürzesten Schuhriemen auskommt.

Keksessen mit Methode

Die von Polster benutzte anspruchsvolle Kombinatorik macht seine Analyse zwar für Kleinkinder ungeeignet, aber das praktische Problem lässt sich fraglos mit Gewinn in der Grundschule behandeln. Welchen Spaß dürfte es den Abc-Schützen machen, ihre Schuhe in fantasievollen Mustern neu zu schnüren und durch spielerisches Ausprobieren festzustellen, wie unglaublich viele Möglichkeiten es gibt. Wenn der Lehrer dann erklärt, dass es nach den Berechnungen eines Mathematikers genau 43 200 sind, kennt das Staunen keine Grenzen.

Man könnte die Grundschüler auch fragen, wie Polster wohl auf die Idee kam, sich mit dem Schuheschnüren zu befassen. Das ergäbe eine gute Überleitung zu einem anderen alltäglichen Problem, das ebenfalls veranschaulicht, was es heißt, etwas zu entwerfen oder zu konstruieren. Physiker von der Universität Cambridge hatten nämlich berechnet, auf wie viele Arten man eine Krawatte binden kann, und Polster damit zu seinen Untersuchungen angeregt. Auch wenn die Kinder keine Schuluniform tragen, können sie sich für dieses Problem sicher begeistern und es zu Hause im Familienkreis weiter praktisch erforschen.



Der Pausensnack bietet ebenfalls eine Gelegenheit, unterhaltsam in die Welt der Schöpfer technischer Konstruktionen einzuführen. Stellen Sie sich vor, Sie müssten sich eine Methode ausdenken, einen Prinzenrolle-Schokokeks – bei dem sich die Schokoladenschicht sandwichartig zwischen den beiden runden Kekscheiben befindet – zu einem Glas Milch zu essen. Verschiedene Kinder (und Erwachsene) haben da so ihre eigenen Vorgehensweisen. Wessen Mund groß genug ist, der stopft sich vielleicht den ganzen Keks auf einmal hinein. Die meisten aber essen ihn häppchenweise. Die einen beißen jeweils ein Stück ab, als wäre es ein echtes Sandwich. Andere entfernen durch Verdrehen, seitliches Drücken oder Stemmen zunächst den »Deckel«, sodass die innere Schokoladenschicht freiliegt.

Dies eröffnet weitere Optionen. Manche essen den Deckel sofort auf, während besonders Naschhafte ihn beiseite legen und sich zunächst der Schokocreme zuwenden. Selbst da gibt es wieder Varianten. Die einen lecken an der Creme, die anderen schaben sie mit den Zähnen ab, wobei sie entweder die obere oder die untere Zahnreihe benutzen. Wenn sie fertig sind, müssen sie schließlich entscheiden, ob sie den Boden oder den beiseite gelegten Deckel als Nächstes verspeisen. Das Glas Milch vermehrt das Spektrum der Möglichkeiten noch: Man kann in verschiedenen Stadien des Essens einen Schluck nehmen oder das jeweilige Keksstück eintauchen.

Letztlich gibt es beliebig viele Beispiele für alltägliche Verrichtungen, die sich auf verschiedene Arten erledigen lassen. Ich erinnere mich etwa, dass in einer Episode der US-Fernsehserie »All in the Family« aus den 1970er Jahren (dem Vorbild für »Ein Herz und eine Seele« in Deutschland) Mike Stivic einen hysterischen Anfall bekommt, als er seinem Schwiegervater Archie Bunker (das Pendant zu Ekel Alfred) beim Anziehen zusieht. Der nämlich streift sich zunächst an einem Fuß den Strumpf über, schlüpft danach gleich in den Schuh und bindet ihn, bevor er dasselbe mit dem anderen Fuß macht. Für Mike dagegen ist die einzig richtige Vorgehensweise, erst beide Socken und anschließend – in derselben Reihenfolge – die Schuhe anzuziehen. In einer ironischen Parodie seiner politischen Haltung erweist sich der liberale Gegenspieler des erzkonservativen Haustyrannen Archie hier als höchst intolerant in Alltagsfragen.

Manchmal gebietet es die Etikette, Dinge auf eine bestimmte Weise zu tun, auch wenn es viele andere Arten gibt. So würden bei zeremoniellen Anlässen Abweichungen vom vorgeschriebenen Protokoll die feierliche Atmosphäre stören. Allgemein können Verstöße gegen die Umgangsformen verletzend wirken. Auch wenn soziale Regeln wie etwa die Tischsitten manchmal willkürlich anmuten und die Kreativität hemmen, kann ihre Missachtung zum Beispiel ein gemeinsames Mahl – besonders mit Fremden – zu einer unappetitlichen Angelegenheit machen. Denken Sie an ein Geschäftsessen, dessen Teilnehmer sich so ungeniert benehmen wie Kinder beim Verzehr eines Schokokekses. Auf wie viele Arten man auch ein Sandwich verspeisen kann, es gibt rein praktische Gründe, der gängigen Methode zu folgen. Indem wir es als Ganzes zum Mund führen und Bissen davon abbeißen, honorieren wir eines der Gestaltungsprinzipien für dieses Nahrungsmittel: Der dreilagige Aufbau soll gewährleisten, dass die Finger frei von Senf und Majonäse bleiben. Das wiederum garantiert dem Glas, aus dem wir trinken, ein relativ sauberes Äußeres und sorgt dafür, dass uns die Geschäftsfreunde zum Abschied die Hände schütteln können, ohne das Gefühl zu haben, als Geschirrtuch missbraucht zu werden.

Ähnlich verhält es sich mit Spielen wie Fußball, Tennis oder Golf. Nur ein Satz allgemein anerkannter Regeln verhindert das Chaos und gewährleistet einen geordneten Verlauf mit einem fairen Ergebnis. Jeder Wettbewerb erfordert strenge Richtlinien, um Ungerechtigkeiten auszuschließen. In analoger Weise müssen sich Ingenieure an Regeln halten: die Gesetze der Physik und Chemie.

Die tausend Arten, ein Puzzle zu legen

Auch bei einem Puzzle gibt es viele Wege, die Hunderte von unterschiedlich gefärbten und zugeschnittenen Teilen zu einem Bild zusammenzulegen. Theoretisch kann man ein beliebiges herausgreifen und der Reihe nach alle anderen durchprobieren, bis man ein passendes gefunden hat. Indem man sich so systematisch vorarbeitet, gelangt man irgendwann sicher ans Ziel. Doch kenne ich niemanden, der auf diese mühsame und stupide Weise vorgeht. Schließlich besteht ein Teil der Herausforderung darin, das Puzzle so schnell und effizient wie möglich zusammenzusetzen. Die meisten Menschen suchen deshalb zunächst nach Eck- oder Randstücken und arbeiten sich von außen nach innen vor. Dadurch ist die Auswahl der in Frage kommenden Teile jeweils geringer.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Beim Legen von Puzzles – einem beliebten Zeitvertreib von Kindern und manchen Erwachsenen – kommt es darauf an, effiziente Strategien zu entwickeln. Ähnliches macht der Ingenieur beim Entwerfen.

Auch Ingenieure suchen ihr Konstruktionsziel auf die effizienteste Weise zu erreichen. Es gibt zahlreiche Arten, eine Vorrichtung zu bauen, mit der man trockenen Fußes auf die andere Seite eines Gewässers gelangt – angefangen bei einer Serie von Trittsteinen bis hin zu einer majestätischen Stahlseilbrücke oder einem Tunnel. Was sich als Günstigstes erweist, hängt von vielen Faktoren ab – etwa der Tiefe und Breite des Gewässers, der Beschaffenheit seines Untergrunds oder dem Ausmaß des Schiffsverkehrs. So engen geografische und wirtschaftliche Randbedingungen die Unzahl denkbarer Konstruktionen auf einige wenige ein. Erfahrene Ingenieure wissen, was unter welchen Bedingungen die beste Lösung ist – genau wie erfahrene Spieler aussichtsreiche Gewinnstrategien kennen oder erfahrene Puzzleleger eine Vorstellung davon haben, mit welchen Teilen man beginnen sollte. Jeder profitiert von Erfahrungen, aber wenn er sich auf ein neues Gebiet wagt, muss er sie erst noch sammeln. Bis dahin empfiehlt es sich, auf die Erfahrungen anderer zurückzugreifen. Das gilt auch für einen Schüler, der seine berufliche Karriere plant.

Kinder orientieren sich bei ihrem Berufswunsch oft an realen Vorbildern – sei es in ihrem persönlichen Umfeld oder im Fernsehen. Früher wollten sie deshalb oft Cowboy, Kran- ▷



GERHARD TRAGESER

Das Binden von Schuhen ist die erste ernsthafte Konstruktionsaufgabe, die ein Kind bewältigen muss.

kenschwester oder Lehrer werden. Heute sind Astronaut, Boxer oder Popstar besonders beliebt. Viele Kinder beziehen die Anregung für ihren Berufswunsch aus der Schule. Lehrern kommt daher die wichtige Aufgabe zu, Möglichkeiten aufzuzeigen und ihren Schützlingen nahe zu bringen. Die Ingenieurwissenschaften werden da leider meist übersehen.

Dabei kommen Schüler in der Mittel- und Oberstufe sehr wohl mit Aufgaben in Berührung, bei denen es um das Entwerfen oder Konstruieren eines Objekts geht. Gewöhnlich geschieht das in Verbindung mit »Wissenschaftsprojekten«, die in Wahrheit »Ingenieursprojekte« sind – etwa Wettbewerbe, bei denen die Schüler aus Balsaholz, Eisstielen, Spagetti oder ähnlich fragilen Materialien eine Brücke bauen sollen. Obwohl diese Projekte unter wissenschaftlicher Flagge segeln, erhalten die Teilnehmer selten eine substanzielle Anleitung, wie sie die Kräfteverteilung in dem Bauwerk visualisieren, geschweige denn berechnen können. Die meisten ahmen deshalb einfach Brücken nach, die sie irgendwo in natura oder auf Bildern gesehen haben. Inzwischen finden sich auch im Internet kostenlose Computerprogramme wie den West Point Bridge Designer (http://bridgecontest.usma.edu), mit denen Schüler virtuelle Brücken entwerfen und am Bildschirm testen können.

Von der Sandburg zum Wolkenkratzer

Vor dem Einsturz der Zwillingstürme des World Trade Center, live im Fernsehen übertragen und dann tagelang immer wieder gezeigt, war der Kollaps der Tacoma-Brücke im Jahr 1940 das bekannteste Versagen eines Bauwerks. Auch dieses Unglück wurde gefilmt und Generationen von Oberschülern, meist im Physikunterricht, als Beispiel dafür vorgeführt, wie der Wind verhängnisvolle Resonanzschwingungen auslösen kann. In Wahrheit war die Einsturzursache allerdings viel komplizierter. Nun kann man nicht unbedingt erwarten, dass der Physikunterricht in der Oberstufe auf solche Details eingeht. Trotzdem böte die Katastrophe eine gute Gelegenheit, etwas über Brücken als spektakuläre Zeugnisse der Ingenieurskunst zu erzählen. Statt nur das dramatische Ende zu betrachten, um ein physikalisches Prinzip zu illustrieren, könnten Lehrer ein paar Hintergrundinformationen über die ungewöhnliche, wenn auch fehlerhafte Konstruktionsweise der Brücke liefern und so den Schülern einen Beruf vorstellen, den manche vielleicht attraktiv finden, weil er ihnen die Chance eröffnet, die Welt im positiven Sinne umzugestalten.

Zu den beliebten praktischen Aufgaben in der Mittel- und Oberstufe zählt auch, kleine Fahrzeuge zu bauen, die von einem gedehnten Gummiband oder einer gespannten Sprungfeder angetrieben werden. Auch das ist ein echtes ingenieurwissenschaftliches Konstruktionsproblem, wird aber fast nie als solches präsentiert. Bestenfalls läuft es unter dem Etikett der angewandten Physik, meist aber ist es nur ein Wettstreit, wessen Auto am schnellsten oder weitesten fährt. Nicht dass ich den Schülern den Spaß an dem Rennen verderben möchte, aber ich finde es schade, wie hier eine pädagogische Chance verschenkt wird, in die Freuden des Konstruierens einzuführen und die Schüler darauf hinzuweisen, dass sie im Grunde Ingenieurwissenschaften betreiben – etwas, mit dem sie sich ihr Leben lang vergnügen können, wenn sie nur genügend Mathematik, Physik und Chemie lernen, um die Zugangsbedingungen für eine Fachhochschule zu erfüllen.

Freilich kann man den Lehrern schlecht vorwerfen, keine Werbung für das Ingenieurwesen zu machen, wenn sie selbst in ihrer Ausbildung nichts darüber erfahren haben. Ingenieurwissenschaften werden weder an pädagogischen Hochschulen gelehrt noch gibt es sie an der Universität als Fach für Lehramtskandidaten. Man kann das Staatsexamen machen, ohne aus persönlicher Anschauung erfahren zu haben, dass der Ingenieurberuf ebenso achtbar, erfüllend und befriedigend ist wie der eines Arztes oder Rechtsanwalts. Mediziner und Juristen haben mir versichert, wie sehr sie es bedauern, in der Schule nicht stärker mit diesem Gebiet in Berührung gekommen zu sein.

Wenn ich die Ingenieurwissenschaft mit dem Bau von Sandburgen, dem Schuhebinden oder dem Essen von Keksen vergleiche, will ich sie nicht trivialisieren, sondern ihre menschliche Seite aufzeigen. In der allgemeinen Bevölkerung wie auch bei Lehrern herrscht die Ansicht, der Ingenieurberuf sei eine kalte, nüchterne Tätigkeit ohne humanen Touch, die wenig innere Befriedigung verschaffe. Wer so etwas glaubt, kennt keine Ingenieure und hat keine realistische Vorstellung von dem, was sie tun. Sie sind natürlich keine Kinder mehr, die Holzklötzchen stapeln oder Puppen zerlegen, aber viele von ihnen haben sich eine kindliche Begeisterungsfähigkeit für den fantasievollen Umgang mit den grundlegenden Bausteinen unserer Welt bewahrt – seien es Werkstoffe wie Holz, Beton und Stahl oder Atome, Moleküle und Mikroben. Sie wissen, dass die Ergebnisse ihres Entwerfens, Konstruierens, Bauens und Testens entscheidend zur Erhaltung und Fortentwicklung unserer Zivilisation beitragen. Und wir alle sollten das schon als Kinder begreifen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Henry Petroski ist Professor für Bauingenieurwesen und für Geschichte an der Duke-Universität in Durham (North Carolina).

Seeking perfection in shoe lacing. Von Kenneth Chang in: New York Times, 10.12.2002, S. D3

What is the best way to lace your shoes? Von Burkard Polster in: Nature, Bd. 420, S. 476, 2002

Designing tie knots by random walks. Von Thomas M. Fink und Mao Yong in: Nature, Bd. 398, S. 31, 1999

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Heuschrecken-Radar

»Da Heuschrecken … etwa zur Hälfte aus Wasser bestehen, konnte man berechnen, daß ein Schwarm von normaler Dichte schon allein durch seinen Wassergehalt auf dem Radarschirm ein Echo geben sollte … Der erste beobachtete Schwarm hatte circa 20 km Durchmesser und war bis zu 100 km entfernt. Das Bild auf dem Schirm ähnelte den Bildern, die sie während des Krieges von den zur Störung abgeworfenen Metallfolien erhalten wurden. Damit ist der Beweis erbracht, daß auch in der Praxis Heuschreckenschwärme auf größere Entfernungen entdeckt und rechtzeitig Bekämpfungsmaßnahmen eingeleitet werden können.« *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 8. Jg, Heft 8, S. 321, August 1955)*

Neuartige Krebsbehandlung

»Bei Krebsbefall der Bauchspeicheldrüse war eine Behandlung mit radioaktiven Strahlen bisher kaum durchführbar. Eine verblüffend einfache Methode entwickelte nun Dr. Paul Harper … Um die erkrankte Stelle wird ein hohler, mit zwei Stutzen versehender Polyäthyen-Ring gelegt … Durch ein Ende wird radioaktives Jod …eingefüllt. Beide Enden werden dann luft- und keimdicht verschlossen. Das Jod wird nach etwa 8 Tagen unwirksam und kann … erneuert werden. Bei Beendigung der Behandlung wird das Jod herausgenommen. Der Ring kann um die Drüsen liegen bleiben, die Stutzen wachsen ein; eine neue Operation ist nicht nötig.« *(Orion, 10. Jg, Nr. 15/16, S. 666, August 1955)*

Die Hörbrille

»Als Verstärkungselemente für diese Hörhilfe werden nicht ausschließlich Transistoren, sondern auch zwei Subminiaturröhren verwendet. In den Bügeln sind ein Kristallmikrofon und ein Hörhilfeverstärker mit Anodenbatterie … untergebracht. Die Bauelemente sind auf beide Brillenbügel verteilt und durch Leitungen … verbunden. Beim Einschlagen der Bügel wird die Stromzuführung unterbrochen, so daß sich beim Abnehmen der Brille der Verstärker automatisch ausschaltet. Außerdem kann er bei aufgesetzter Brille … mit dem Lautstärkeregler ausgeschaltet werden.« *(Funkschau, 27. Jg., 1. August-Heft, Nr. 15, S. 326, August 1955)*

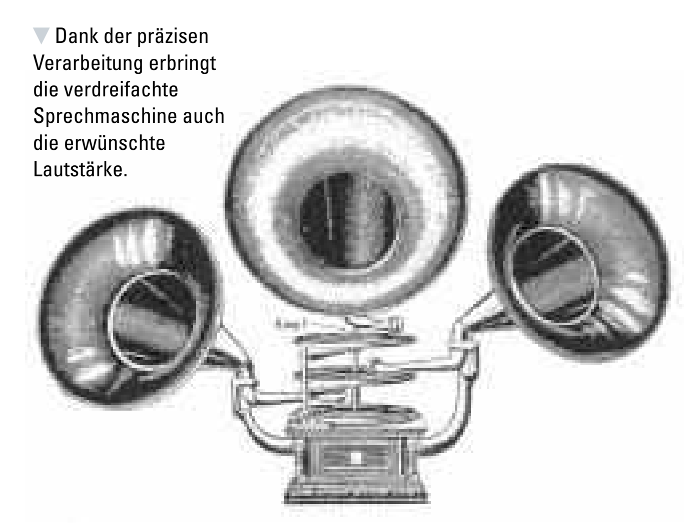


▲ Die Bauteile der Hörbrille sind geschickt in den modisch breiten Bügeln versteckt.

Dreifache Beschallung

»Die Grammophon-Gesellschaft konstruierte eine höchst originelle Sprechmaschine, bei der durch ein gemeinschaftliches Uhrwerk angetrieben, drei Schallplatten übereinander gelegt sind, deren jede mit einer eigenen Schalldose und zugehörigem Schalltrichter ausgestattet ist. Es wurde also bezweckt, durch eine Addition, … die Lautwiedergabe der Sprechmaschine zu verdreifachen … Selbstverständlich müssen die drei Platten so genau eingestellt werden, daß die Anfänge der eingegrabenen Tonrillen haarscharf übereinanderstehen. Noch schwieriger ist es, die Nadeln der Schalldosen so genau in die Rillen einzustellen, daß die Töne von jeder Platte im gleichen Moment erzeugt werden.« *(Für Jedermann, Nr. 8, S. 118, 1905)*

▼ Dank der präzisen Verarbeitung erbringt die verdreifachte Sprechmaschine auch die erwünschte Lautstärke.



Schädliches Licht



»Die Wirkung des elektrischen Lichts auf die Augen ist oft verdächtigt worden … Der schädliche Bestandteil beruht … auf den chemischen Strahlen … Wie allerdings jeder weiß, verdirbt eine Gaslampe die umgebende Luft in höherem Grade als eine elektrische, und diese Wirkung wird auch von Aerzten als weit gefährlicher für die Augen bezeichnet als die Beimischung chemischer Strahlen … Es kommt vorläufig darauf an, überall in künstlich erleuchteten Räumen für eine möglichst gute Ventilation zu sorgen, als sich um die chemischen Strahlen in den einzelnen Lichtquellen zu bekümmern.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 195, S. 375, August 1905)*

Metallischer Überzug für Papier

»Aluminiumpapier wird … für die Benutzung an Stelle des alten Stanniol empfohlen. Es handelt sich … um wirkliches Papier, das … besonders günstige Eigenschaften für die Haltbarkeit von Nahrungsmitteln besitzen soll … Der Grundstoff ist künstliches Pergament, das … auf der einen Seite mit einer dünnen Schicht einer Lösung von Harz in Alkohol versehen wird … Dann wird Aluminiumpulver aufgestreut und das Ganze unter starken Druck gebracht, damit das Pulver auf dem Papier festgepreßt wird. Der metallische Überzug wird weder von Luft noch von fettigen Körpern angegriffen.« *(Für Jedermann, Nr. 8, S. 119, 1905)*

Schwarze Löcher im Labor

Gefräßige Schwerkraftexoten sind sie, die im Weltall schon Mal ganze Sterne verschlingen können. Jetzt halten Forscher es für möglich, die Monster im Miniformat selbst erzeugen zu können

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

WEITERE THEMEN IM SEPTEMBER

Gutes Gedächtnis

Viele Eindrücke entschwinden dem Gedächtnis nur allzu rasch. Forscher klären jetzt, wann Inhalte auch langfristig haften bleiben



RON MILLER

Vielseitiger Mars

Die Nasa-Rover entdeckten Steinwüsten und ausgetrocknete Seen, Marsorbiter fotografierten Gletscherströme, Schneefelder und jungen Vukanismus – der Rote Planet ist komplexer als gedacht



MIT FRDL. GEN. VON NIKON INSTRUMENTS

Schönheit im Mikroskop

Mit raffinierten Lichttechniken und hoher Auflösung gewinnen Fotografen reizvolle Ansichten der Natur, wie hier vom Pollensack einer Virginischen Dreimastblume



JEN CHRISTIANSEN

Künstlicher Kälteschlaf als Lebensretter

Von einer Art Schwebezustand zwischen Leben und Tod versprechen sich Forscher Zeitgewinn in medizinischen Notfällen